

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO
MESTRADO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

CRISTIANE KARYN DE CARVALHO ARAÚJO

PRÁTICAS DE ECONOMIA CIRCULAR NO SISTEMA PRODUTIVO
DE PAINÉIS DE MADEIRA

DISSERTAÇÃO

PONTA GROSSA
2020

CRISTIANE KARYN DE CARVALHO ARAÚJO

**PRÁTICAS DE ECONOMIA CIRCULAR NO SISTEMA PRODUTIVO
DE PAINÉIS DE MADEIRA**

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Cassiano Moro Piekarski

PONTA GROSSA

2020

Ficha catalográfica elaborada pelo Departamento de Biblioteca
da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Câmpus Ponta Grossa
n.37/20

A663 Araújo, Cristiane Karyn de Carvalho

Práticas de economia circular no sistema produtivo de painéis de madeira. / Cristiane Karyn de Carvalho Araújo, 2020.
109 f.; il. 30 cm.

Orientador: Prof. Dr. Cassiano Moro Piekarski

Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2020.

1. Economia social. 2. Economia ambiental. 3. Negócios - Modelos. 4. Madeira - Produtos. I. Piekarski, Cassiano Moro. II. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. III. Título.

CDD 670.42

Eelson Heraldo Ribeiro Junior. CRB-9/1413. 27/04/2020.



Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Ponta Grossa
Diretoria de Pesquisa e Pós-Graduação
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA DE PRODUÇÃO



FOLHA DE APROVAÇÃO

Título da Dissertação Nº **347/2020**

PRÁTICAS DE ECONOMIA CIRCULAR NO SISTEMA PRODUTIVO DE PAINÉIS DE MADEIRA

por

Cristiane Karyn de Carvalho Araújo

Esta dissertação foi apresentada às 10 horas de **20 de fevereiro de 2020** como requisito parcial para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, com área de concentração em Gestão Industrial, linha de pesquisa em Gestão da Produção e Manutenção, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção. A candidata foi arguida pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo citados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. Dr. Diogo Aparecido Lopes Silva
(UFSCar)

Prof. Dr. Fábio Neves Puglieri
(UTFPR)

Prof. Dr. Antonio Carlos de Francisco
(UTFPR)

Prof. Dr. Cassiano Moro Piekarski
(UTFPR) – Orientador

Prof. Dr. Cassiano Moro Piekarski (UTFPR)
Coordenador do PPGEP

- A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Programa -

Dedico este trabalho à minha família e amigos que me apoiaram neste desafio.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente sou grata a Deus por me proporcionar esta oportunidade, me guiando e dando-me sabedoria e capacidade para trilhar este caminho.

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Cassiano Moro Piekarski, pela paciência e sabedoria com que me guiou nesta trajetória.

Aos meus pais Nilton e Claudinéia por me apoiarem e me fornecerem todo o suporte necessário, apesar das dificuldades enfrentadas sempre incentivaram os meus estudos e, me ensinaram a nunca desistir dos meus sonhos.

As minhas irmãs (Sâmella, Sâmique, Camilla) e, cunhados (Rafael, Bruno, Kawê) que sempre estiveram ao meu lado me apoiando e me fazendo rir nos momentos de tristezas, me motivando sempre a seguir em frente.

Ao pessoal do LESP que se tornaram uma família para mim, agradeço por cada um ter feito parte dessa conquista de alguma forma.

A minha amiga Mari, pelas conversas do dia-a-dia e pela dedicação em me ajudar.

A Secretaria do Curso pela dedicação, presteza e principalmente pela vontade de ajudar.

Gostaria de deixar registrado também, o meu reconhecimento a todos que por algum motivo contribuíram para a realização deste trabalho.

Este trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES).

“A maior recompensa para o trabalho do homem não é o que ele ganha com isso, mas o que ele se torna com isso” (RUSKIN, John).

RESUMO

ARAÚJO, Cristiane Karyn de Carvalho. **Práticas de economia circular no sistema produtivo de painéis de madeira.** 2020. 108 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2020.

A escassez de recursos naturais vinculada ao excesso de resíduos sem descarte adequado tornou-se preocupação mundial, inclusive no sistema produtivo de painéis de madeira, onde há necessidade da adoção de novas metodologias que corroborem com a redução de ambos. Diante dessa problemática, o presente estudo teve por objetivo identificar práticas de economia circular atuais e potenciais para o sistema produtivo de painéis de madeira. Inicialmente foram realizadas buscas na literatura a fim de identificar e selecionar artigos relevantes ao tema, além, de verificar os estudos englobando a economia circular no sistema produtivo de painéis de madeira. Com os artigos selecionados, evidenciou-se que o setor de painéis de madeira trabalha com adoção de práticas ambientais, no entanto, notou-se um déficit de trabalhos relacionados à economia circular na indústria de painéis. Então, elaborou-se fluxogramas do sistema produtivo dos painéis de madeira reconstituída, com abordagens de ciclos biológicos e técnicos, pelos quais pode-se observar indícios de circularidade em alguns pontos da etapa produtiva, sendo eles, aproveitamento de resíduos para combustão e geração de energia, utilização das cinzas de caldeira e lodo da estação de tratamento para compostagem e, uso de energias renováveis. Após esta etapa, analisou-se o ciclo de vida dos painéis de madeira, levantando os principais *hotspots* por fase e processos do ciclo de vida, os quais auxiliaram na identificação de mudanças no sistema produtivo e, construção de atividades para modelos de negócios. Na sequência, foi realizado o cálculo de circularidade dos três painéis adotados neste estudo, tendo como embasamento 5, 10 e 15 anos de vida útil. Com isso, pôde-se observar que os três painéis, MDP, MDF e OSB não apresentam circularidade em 5 anos, já em 10 anos e 15 anos de uso observa-se indícios de circularidade, variando de 10 a 50% e, 40 a 60% de circularidade, respectivamente, dependendo do tipo de painel e dos cenários de reutilização analisados. Constatou-se também que nenhum dos painéis apresentou 100% de circularidade, o que pode ser explicado pela alta quantidade de material virgem consumido, perdas existentes no processo produtivo, perdas envolvendo a reutilização do produto e, falta de abordagens de reciclagem. Ainda como resultado, foram identificadas as práticas de economia circular já existentes no sistema produtivo de painéis de madeira, sendo estas relacionadas aos cinco modelos de negócios empregados neste estudo, os quais também possibilitaram a identificação de potenciais práticas que visam corroborar o aumento da circularidade.

Palavras-chave: Economia circular. Bioeconomia. Modelo de negócios. Indicador de circularidade.

ABSTRACT

ARAÚJO, Cristiane Karyn de Carvalho. **Practices of circular economy in the wood panel production system**. 2020. 108 p. Thesis (Master's Degree in Production Engineering) - Federal University of Technology - Paraná. Ponta Grossa, 2020.

The scarcity of natural resources linked to excess waste without proper disposal has become a worldwide concern, including in the wood panel production system, where it is necessary to adopt new methodologies that corroborate both. Given this problem, the present study aimed to identify current and potential circular economy practices for the wood panel production system. Initially, searches were carried out in the literature to identify and select articles relevant to the theme, in addition to verifying the studies that encompass the circular economy in the wood panel production system. With the selected articles, it was evident that the wood panel sector works with the adoption of environmental practices, however, there is also a deficit of works related to the circular economy in the panel industry. Then, flowcharts of the production system of the reconstituted wood panels were elaborated, with approaches of biological and technical cycles, through which it is possible to observe signs of circularity in some points of the production stage, namely, use of residues for combustion and energy generation, use of boiler ash and sludge from the treatment plant for composting and use of renewable energy. After this stage, the life cycle of the wooden panels was analyzed, researching the main hotspots through phase and life cycle processes, which helped in the identification of changes in the production system and in the construction of activities for the models of Business. Then, the circularity of the three panels adopted in this study was calculated, based on the 5, 10 and 15 years of useful life. Thus, it was observed that the three panels, MDP, MDF and OSB, do not show circularity in 5 years, already in 10 and 15 years of use there are signs of circularity, ranging from 10 to 50% and 40 to 60% of circularity, respectively, depending on the type of panel and the reuse scenarios analyzed. It was also found that none of the panels showed 100% circularity, which can be explained by the large amount of virgin material consumed, losses in the production process, losses involving the reuse of the product and lack of recycling approaches. As a result, the circular economy practices already existing in the wood panel production system were identified, related to the five business models employed in this study, which also made it possible to identify potential practices that aim to corroborate the increase in circularity.

Keywords: Circular economy. Bioeconomy. Business model. Circularity indicator.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1- Estrutura do trabalho.....	19
Figura 2- Procedimentos para formação do portfólio bibliográfico	21
Figura 3- MDP	33
Figura 4- Distribuição das camadas de MDP	34
Figura 5- Painel MDF	37
Figura 6- Painel OSB	40
Figura 7- Aplicações do MDP	45
Figura 8- Aplicações do MDF	46
Figura 9- Aplicação de OSB	46
Figura 10- Fronteiras do sistema do ciclo de painéis de madeira	48
Figura 11- Diagrama Borboleta do Sistema de Economia Circular	53
Figura 12- Itens considerados para o cálculo do MCI	58
Figura 13- Produção de painéis MDP	64
Figura 14- Produção de painéis MDF.....	67
Figura 15- Sistema de Produção de OSB	69
Figura 16- Modelos de negócios de economia circular no sistema produtivo de painéis de madeira	90
Gráfico 1- Produção Nacional	42
Gráfico 2- Exportação de painéis	43
Gráfico 3- Cenários de circularidade dos painéis de madeira	89
Quadro 1- Combinações de palavras-chave	22
Quadro 2- Portfólio final de artigos	24
Quadro 3- Classificação e característica dos PMR's.....	31
Quadro 4- Uso e aplicações de PMR's.....	44
Quadro 5- Classificação dos recursos utilizados na produção de painéis de madeira	49
Quadro 6- Fronteiras do sistema adotadas pelos estudos	71
Quadro 7- Perspectiva <i>Cradle-to-Gate</i>	73
Quadro 8- Perspectiva <i>Gate-to-Gate</i>	79
Quadro 9- Práticas de economia circular identificadas no sistema produtivo de painéis de madeira	82

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Combinações de palavras-chave	23
Tabela 2- Entrada de Materiais Virgens	83
Tabela 4- Resíduos Irrecuperáveis	85
Tabela 5- Rejeitos totais irrecuperáveis	86
Tabela 6- Índice de Fluxo Linear	87
Tabela 7- Fator utilitário	88
Tabela 8- Níveis de circularidade	88

LISTA DE SIGLA E ACRÔNIMOS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACV	Avaliação do Ciclo de Vida
AICV	Avaliação de Inventário de Ciclo de Vida
ANP	Anuário Estatístico Brasileiro do Petróleo
APA	<i>The Engineered Wood Association</i>
APRE	Associação Paranaense de Empresas de Base Florestal
BNDES	Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social
BS	<i>The British Standard Institution</i>
CE	Camada Externa
CI	Camada Interna
CSA	<i>Canadian Standards Association</i>
EC	Economia Circular
EGP	Painel colado Lateral
EMF	<i>Ellen MacArthur Foundation</i>
EM	<i>European Committee for Standardization</i>
FAO	Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura
FF	Fenol Formaldeído
HDF	<i>High Density Fiberboard</i>
IBÁ	Indústria Brasileira de Árvores
ISSO	<i>International Organization for Standardization</i>
LCA	<i>Life Cycle Assessment</i>
LVL	<i>Laminated Venner Lumber</i>
MCI	Índice de Material Circular
MDF	<i>Medium Density Fiberboard</i>
MDIC	Ministério de Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior
MDP	<i>Medium Density Particleboard</i>
MMA	Ministério do Meio Ambiente
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
ONU	Organização das Nações Unidas
OSB	<i>Oriented Strand Board</i>
PMR	Painel de Madeira Reconstituída
PSS	<i>Product Service System</i>
UF	Ureia-Formaldeído
ABIMCI	Associação Brasileira da Indústria de Madeira Processada Mecanicamente
ABIPA	Associação Brasileira de Painéis de Madeira
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
Proknow-C	<i>Knowledge Development Process – Constructivist</i>

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 OBJETIVOS	15
1.1.1 Objetivo Geral	15
1.1.2 Objetivos Específicos	15
1.2 JUSTIFICATIVA	15
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO	18
2 METODOLOGIA	20
2.1 CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA	20
2.2 CONSTRUÇÃO DO REFERENCIAL TEÓRICO	20
2.3 CARACTERIZAÇÃO E MAPEAMENTO DO CICLO DE VIDA DOS PAINÉIS DE MADEIRA	25
2.4 PROCEDIMENTOS PARA COLETA E ANÁLISE DE DADOS	26
2.4.1 SISTEMA PRODUTIVO DE PAINÉIS DE MADEIRA	26
2.4.2 PRINCIPAIS <i>HOTSPOTS</i> DO CICLO DE VIDA DE PAINÉIS DE MADEIRA	27
2.4.3 PRÁTICAS DE ECONOMIA CIRCULAR NO SISTEMA PRODUTIVO DE PAINÉIS DE MADEIRA	27
2.4.4 ÍNDICE DE CIRCULARIDADE EM PAINÉIS DE MADEIRA	28
2.4.5 MODELOS DE NEGÓCIOS NO SISTEMA PRODUTIVO DE PAINÉIS DE MADEIRA	28
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	30
3.1 PAINÉIS DE MADEIRA	30
3.2 PAINÉIS DE MADEIRA RECONSTITUÍDA	31
3.2.1 Painéis <i>Medium Density Particleboard</i> (MDP)	32
3.2.2 Painéis <i>Medium Density Fiberboard</i> (MDF)	36
3.2.3 Painéis <i>Oriented Strandboard</i> (OSB)	39
3.3 CENÁRIO MERCADOLÓGICO DE PMR'S NO BRASIL	42
3.4 CICLO DE VIDA DE PMR'S	46
3.4.1 Recursos da Biosfera	48
3.4.2 Produção Industrial	51
3.4.3 Distribuição	51
3.4.4 Uso e Fim de Vida	51
3.5 ECONOMIA CIRCULAR	52
3.6 ECONOMIA LINEAR VERSUS ECONOMIA CIRCULAR	54
3.7 INDICADOR DE ECONOMIA CIRCULAR	57

3.7.1 MCI.....	58
3.7.1.1 Material virgem.....	59
3.7.1.2 Resíduos irre recuperáveis.....	59
3.7.1.3 Resíduos gerados no processo de reciclagem.....	59
3.7.1.4 Rejeitos totais e irre recuperáveis.....	60
3.7.1.5 Índice de Fluxo Linear.....	61
3.7.1.6 Fator utilitário.....	61
3.7.1.7 Indicador de Circularidade de Material.....	62
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	63
4.1 SISTEMA PRODUTIVO DE PAINÉIS DE MADEIRA.....	63
4.1.1 Sistema de Produção do MDP.....	64
4.1.2 Sistema de Produção do MDF.....	66
4.1.3 Sistema de Produção de OSB.....	68
4.2 PRINCIPAIS <i>HOTSPOTS</i> DO CICLO DE VIDA DE PAINÉIS DE MADEIRA ...	70
4.2.1 <i>Cradle-to-gate</i>	72
4.2.2 Perspectiva <i>Gate-to-Gate</i>	78
4.3 PRÁTICAS DE ECONOMIA CIRCULAR IDENTIFICADAS.....	81
4.4 ÍNDICE DE CIRCULARIDADE EM PAINÉIS DE MADEIRA.....	83
4.4.1 Entrada de Material Virgem.....	83
4.4.1.1 Resíduos Irre recuperáveis (W_0) de MDP-MDF-OSB destinados a aterro	84
4.4.1.2 Resíduos irre recuperáveis gerados na etapa de reciclagem do MDP- MDF-OSB	85
4.4.1.3 Resíduos gerados para a produção de determinado conteúdo reciclado usado como matéria-prima (W_F).....	86
4.4.1.4 Rejeitos totais irre recuperáveis (W).....	86
4.4.1.5 Índice de Fluxo Linear (LFI).....	86
4.4.1.6 Fator Utilidade (F(X)).....	87
4.4.1.7 Índice de Circularidade (MCI).....	88
4.5 MODELOS DE NEGÓCIOS NO SISTEMA PRODUTIVO DE PAINÉIS.....	90
4.6 SÍNTESE DOS RESULTADOS.....	93
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	95
5.1 SUGESTÕES PARA ESTUDOS FUTUROS.....	97
REFERÊNCIAS.....	98

1 INTRODUÇÃO

Os painéis de madeira surgiram com o isolamento da Alemanha durante a Segunda Guerra mundial, época em que o país se viu diante de dificuldades que o levaram a buscar novas tecnologias para suprir tais adversidades. No ano de 1940, surgiam os painéis de madeira aglomerada, como meio de empregar os resíduos madeireiros disponíveis, onde o cenário de escassez de madeira se fazia presente (IWAKIRI, 2005). Assim, os elementos de madeira passaram a ser substituídos por produtos de madeira reconstituída, produzidos com árvores de pequeno diâmetro e com resíduos madeireiros (IRLE *et al.*, 2012).

Desde então, a demanda por painéis de madeira têm recebido crescente atenção comercial, pois pode ser o principal elemento de vários produtos, como em móveis (BAL; DUMANOGLU, 2019; KIM, 2019), construção (ALWISY *et al.*, 2019; LEHMANN, 2013) e embalagens (TEIXEIRA; SARTORI; FINOTTI, 2010).

Segundo a FAO (2018) - Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação a produção mundial de painéis de madeira em 2018 totalizou $4,1 \times 10^8$ m³ de chapas produzidas. Sendo o Brasil ocupante do 6º lugar entre os maiores produtores mundiais de painéis de madeira, com $7,3 \times 10^7$ m³ de chapas produzidas, ao ano. Dentre as classificações de painéis de madeira produzidos no Brasil, destacam-se em relação à versatilidade de aplicação os painéis de madeira reconstituída, tais como, o *Medium Density Fibeboard* (MDF) e *High Density Fiberboard* (HDF), produção realizada em conjunto, totalizando ($4,5 \times 10^6$ m³) de chapas produzidas ao ano, *Medium Density Particleboard* (MDP) com ($3,1 \times 10^6$ m³) de chapas produzidas ao ano e o OSB com ($2,3 \times 10^5$ m³) de chapas produzidas ao ano, aplicados em sistemas construtivos.

Considerando esse crescimento, observa-se a necessidade cada vez maior de desenvolver uma produção mais sustentável e racional, que garanta a mesma qualidade e durabilidade apresentada pelos materiais concorrentes. Assim, em um mundo cada vez mais competitivo, a busca por ferramentas que permitam atender todas as necessidades dos seus consumidores e, ainda, trabalhar em conformidade com as práticas de responsabilidade social e ambiental se torna imprescindível (FERREIRA; MACHADO, 2010).

A partir deste contexto, técnicas vêm sendo aplicadas a fim de analisar e identificar os principais causadores de impactos ambientais relacionados a um produto

ou processo, tal como, em painéis de madeira (KLEIN *et al.*,2015), pelos quais informações/soluções referentes a minimização de tais impactos são disponibilizados, possibilitando ações para uma produção mais limpa. Dentre diversas técnicas, a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) destaca-se por identificar e quantificar os impactos ambientais de maneira a classificar a principal etapa do ciclo de vida de um produto que possui elevado potencial impacto ambiental (CAMBRIA; PIRANGELI, 2012).

No entanto, a ACV quantifica os impactos e identifica os *hotspots*, para eventuais sugestões de mudanças no sistema, no entanto, não permite a substituição da etapa “fim de vida” do produto, o qual atualmente é uma etapa que necessita de uma atenção maior devido ao excesso de produtos descartados que poderiam ser recuperados, reutilizados ou reciclados. Assim, para uma bioeconomia circular, os recursos biológicos devem ser renováveis, gerenciados de forma sustentável, recuperados e reutilizados quanto possível (CEO GUIDE, 2017).

Para isso, a metodologia de economia circular mostra-se como uma proposta, pois seu principal objetivo é extinguir o fim de vida por meio da redução, reuso, reciclagem e, recuperação de materiais e energia, tendo em vista o desenvolvimento sustentável (KIRCHHERR; REIKE; HEKKERT, 2017), além disso, a economia circular permite identificar o quão circular são os produtos, serviços ou processos.

A economia circular é, portanto, um sistema no qual todas as atividades, desde a extração e a produção, são organizadas de tal maneira que o resíduo de alguém se torna um recurso para outro (FIKSEL; LAL 2018). Assim, considerando as abordagens relacionadas à economia circular e, as características/problemas encontrados no ciclo de vida de painéis de madeira compreende-se que este setor é promissor quanto à análise e inserção de práticas que possibilitem a transição de um modelo linear à circular.

O atual modelo econômico é fortemente dependente de recursos finitos, tais como combustíveis fósseis, com alto risco de escassez de recursos, variações climáticas e, suspensões na cadeia de suprimentos (CEO GUIDE, 2019). O sistema produtivo de painéis de madeira corrobora as consequências do atual modelo econômico.

Neste contexto, pensar no ciclo de vida dos painéis de madeira que é um sistema complexo quanto à geração de impactos ambientais, identificar evidências de circularidade e encontrar novas oportunidades vinculadas à economia circular é o caminho para controlar a escassez de recursos naturais, reduzir o acúmulo de

resíduos e, atenuar os impactos ambientais tanto na produção, uso e descarte do produto. A partir disto o problema de pesquisa foi definido: **Quais as práticas atuais e potenciais de economia circular para sistema produtivo de painéis de madeira?**

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Identificar práticas de economia circular atuais e potenciais para o sistema produtivo de painéis de madeira.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar os painéis de madeira MDP, MDF e OSB;
- Mapear o ciclo de vida dos painéis;
- Levantar os potenciais impactos ambientais associados ao ciclo de vida dos painéis de madeira;
- Levantar evidências de economia circular já existente no processo produtivo dos painéis de madeira;
- Avaliar o potencial de circularidade de painéis a partir de indicadores de economia circular;
- Relacionar práticas de sistema produtivo de painéis de madeira com modelos de negócio para economia circular

1.2 JUSTIFICATIVA

A indústria de painéis de madeira tem a necessidade de modificação de seu sistema produtivo, uma vez que seus produtos são compostos por (CHIPANSKI, 2006):

- Resinas a base de formaldeído proveniente de matéria-prima fóssil não renovável (gás natural e óleo cru);

- Geração de resíduos sólidos de madeira durante a etapa de produção, sendo imprescindível o gerenciamento total e correto para evitar a poluição do solo, rios e atmosfera;
- Uso de combustíveis é outro aspecto relevante a se considerar, pois a matriz energética visa o uso de energias de fontes não renováveis e;
- Por fim, mas não menos importante, durante a fase de fabricação e uso tem-se a liberação do formol, produto este, cancerígeno, o qual necessita de muitos cuidados quando se trata de descarte.

Neste sentido, a primeira justificativa para este estudo é quanto à utilização de recursos não renováveis e produtos tóxicos que compõe o painel de madeira, a fim de identificar potenciais melhorias para o setor.

Outro aspecto justifica-se pelos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) elaborado pela ONU, os quais têm por intuito proteger o planeta da degradação, sobretudo por meio do consumo e da produção sustentável. Dos 17 ODS, o 12 e o 13 estão vinculados a este estudo. O Objetivo 12 que traz por meta assegurar os padrões de produção e consumo sustentável e o Objetivo 13 que visa tomar medidas urgentes a fim de combater as mudanças climáticas (AGENDA 2030, 2019). Metas as quais a indústria de painéis de madeira deve atingir, sendo estas facilitadas pela incorporação do modelo de economia circular em seu processo de produção.

Outro fator a se considerar é que a economia circular neste âmbito pode trazer parcerias com diversas empresas do setor madeireiro e, também inovações de *ecodesign*, o qual tende a ser uma etapa decisiva para evoluir o processo de circularidade nas indústrias de painéis, pois um dos principais objetivos é desenvolver produtos que de alguma maneira irão reduzir o uso de recursos não renováveis ou ainda minimizar o impacto ambiental dos mesmos durante o ciclo de vida, ou seja, significa reduzir a geração de resíduos e economizar custos com disposição final (MMA, 2019).

Salienta-se, ainda, que após o fim de vida dos painéis de madeira, estes poderiam retornar a indústria e serem transformados em um novo produto, mesmo que não possuam as mesmas características físicas e mecânicas que o produzido com matéria-prima virgem. Tais abordagens podem impulsionar o progresso tecnológico das unidades, permitindo a transição para um caminho mais sustentável a médio e longo prazo.

A partir da busca sistemática realizada na seção 2.1, este estudo se caracteriza pela originalidade em identificar evidências de economia circular na produção de painéis de madeira. Sendo que a literatura atual apresenta diversos estudos abordando questões ambientais relacionadas a painéis de madeira, principalmente estudos de ACV (RIVELA *et al.*, 2007; SILVA *et al.*, 2013; BERGMAN *et al.*, 2015; IRITANI *et al.*, 2015; PIEKARSKI *et al.*, 2017; FERRO *et al.*, 2018; NAKANO *et al.*, 2018), expondo os principais impactos ambientais e hotspots encontrados nas fases do ciclo de vida dos painéis, exceto trabalhos abordando os temas economia circular e painéis de madeira até 2018. No início de 2019 um estudo de revisão bibliográfica foi publicado abordando ambos os temas, sendo intitulado, *Circular Economy Practices on Wood Panels: A Bibliographic Analysis* (ARAÚJO *et al.*, 2019).

Tendo em vista que este é um dos primeiros estudos aplicando a economia circular no sistema produtivo de painéis de madeira, os resultados encontrados apresentam contribuições tanto para o meio científico quanto para indústria do setor. O setor pode beneficiar-se de passos para fomentar a economia circular no sistema produtivo, a fim de torná-la mais limpa e eficiente.

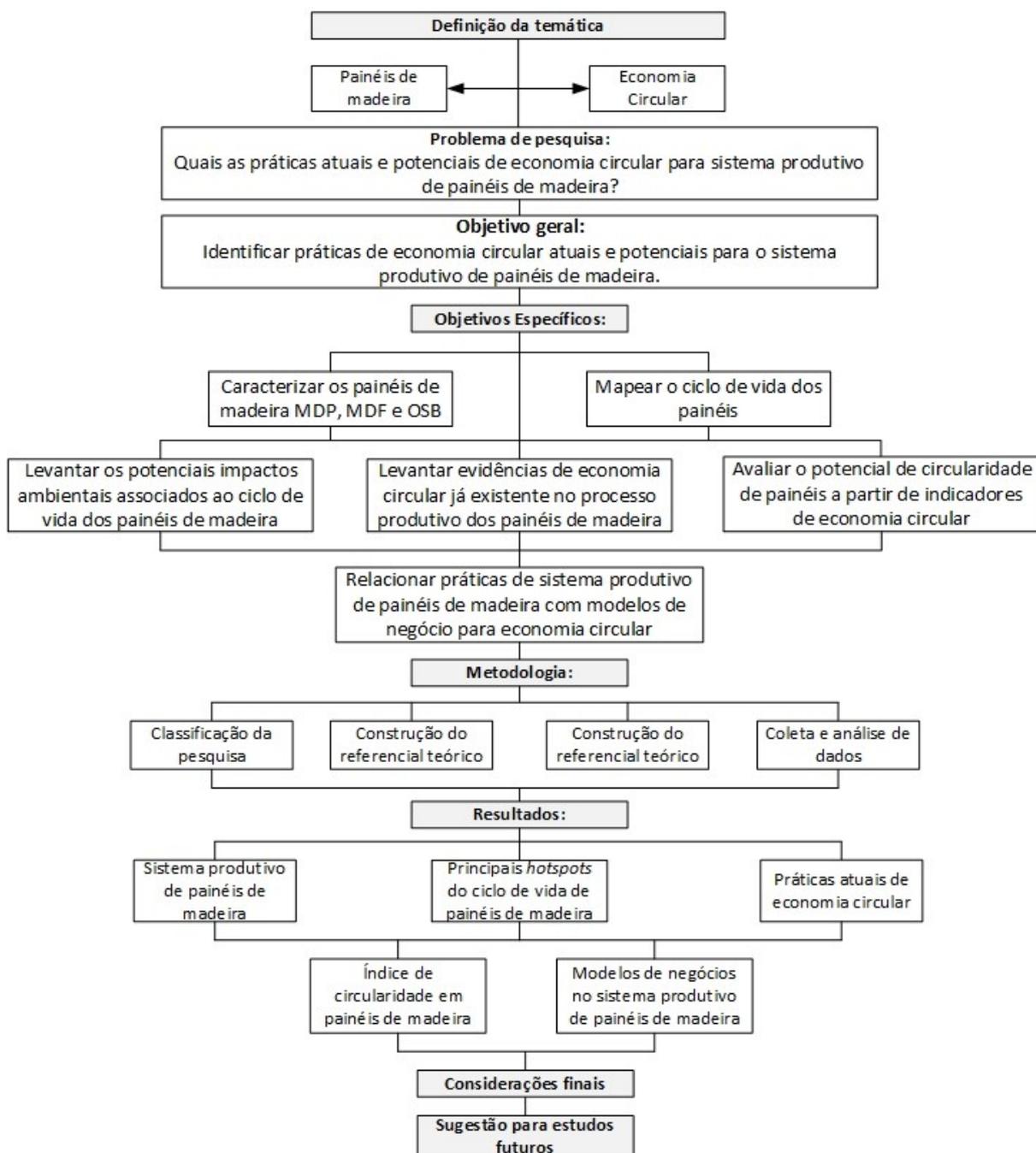
Outro ponto importante a se destacar, é que um sistema produtivo regenerativo apresenta benefícios estratégicos e elevado potencial de inovação, influenciando na geração de empregos e crescimento econômico, devido às novas oportunidades de negócios. Além, da valorização que a empresa recebe da sociedade e mercado, tendo em vista que atividades sustentáveis e ecologicamente correta são bem vistas.

Assim, este estudo apresenta oportunidades em prol de fomentar a economia circular no sistema produtivo de painéis de madeira, servindo de embasamento para indústrias do setor que buscam ações ambientais para uma produção mais limpa e eficiente. Ainda, este trabalho contribui com ações que visam o combate da crescente escassez de recursos, aumento da poluição e vulnerabilidade humana e ambiental a essa poluição.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este estudo está estruturado da seguinte forma. A Seção 2 fornecerá os métodos utilizados para a elaboração da análise bibliográfica da pesquisa e coletas de dados, a Seção 3 fornecerá a revisão bibliográfica sobre Painéis de madeira, Painéis de madeira Reconstituída, Ciclo de vida dos painéis de madeira, Economia Circular e Economia linear versus Economia Circular, bem como alguns aspectos relacionados aos temas abordados. A seção 4 apresenta os resultados obtidos neste trabalho referentes às evidências e oportunidades de circularidade. A seção 5 apresenta as considerações finais e, por fim a seção 6 contempla as referências bibliográficas, como demonstrado na Figura 1.

Figura 1- Estrutura do trabalho



Fonte: Autoria própria

2 METODOLOGIA

Nesta seção, serão apresentados a classificação da pesquisa e os procedimentos metodológicos utilizados para o desenvolvimento deste presente estudo, a fim de alcançar os objetivos propostos.

2.1 CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA

Segundo a classificação de Silveira e Córdova (2009) o presente estudo está classificado como:

Quanto à abordagem, trata-se de uma pesquisa qualitativo-quantitativa, pois os dados relacionados ao ciclo de vida dos painéis de madeira são apresentados de forma quantitativa. Ao mesmo tempo os princípios de economia circular e as propostas de melhorias ambientais para aumentar a circularidade neste setor caracterizam-se como qualitativas.

Quanto à natureza, trata-se de uma pesquisa aplicada, pois gerou novos conhecimentos embasados em uma metodologia específica, aplicada em indústrias específicas. Os conhecimentos obtidos podem ser aplicados em busca de solucionar os problemas de “linearidade” existente na indústria de painéis de madeira.

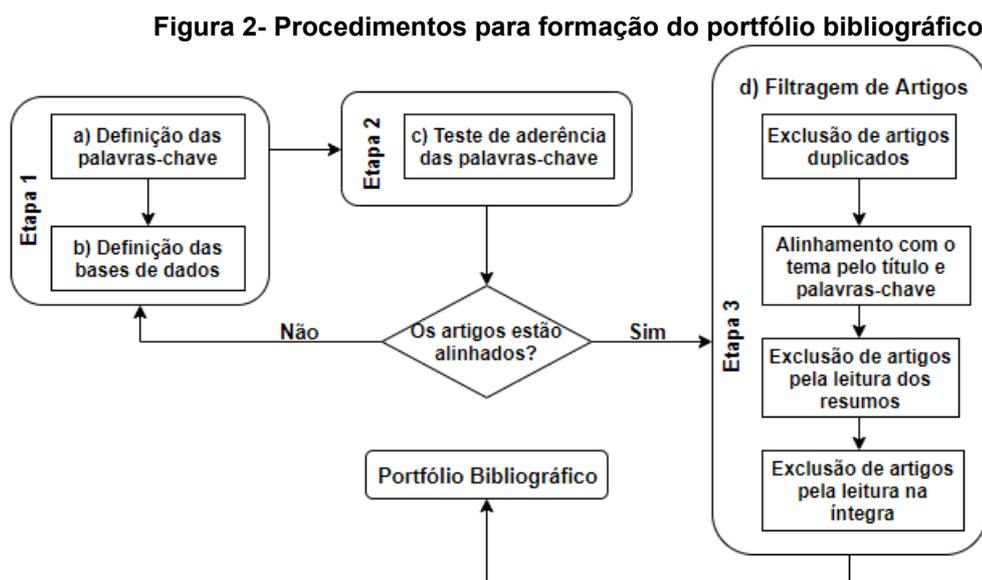
Quanto aos objetivos, o estudo é exploratório, pois realizou-se levantamentos em estudos bibliográficos, relatórios de sustentabilidade e em estudos de avaliação do ciclo de vida dos painéis de madeira. Pelos quais analisou-se problemas que resultaram em soluções.

Quanto aos procedimentos técnicos, trata-se de um levantamento, pois os dados foram obtidos por meio de coleta de dados em estudos de casos dispostos na literatura e relatórios de sustentabilidade disponibilizados pelas empresas.

2.2 CONSTRUÇÃO DO REFERENCIAL TEÓRICO

Com o objetivo de realizar uma revisão sistemática da literatura e montar o portfólio bibliográfico do presente estudo, empregou-se como instrumento de busca a fase de “seleção de portfólio bibliográfico” disponibilizada pelo modelo *Knowledge Development Process - Constructivist (Proknow- C)* proposto por Ensslin e Ensslin

(2007) e Ensslin *et al.* (2013), apresentados na Figura 2. Nesta fase, buscou-se identificar estudos que aprofundam o tema economia circular em painéis de madeira e, identificar as etapas do sistema de produção de painéis que a economia circular se encaixa.



Fonte: Autoria própria

Etapa1:

a) Definição das palavras-chave

A primeira fase da seleção dos artigos, foi dada pela definição das palavras-chave, sendo o eixo 1 relacionado ao tema economia circular composto pelas palavras-chaves: “*circular economy*”, “*industrial symbiosis*” e “*industrial ecology*”.

Para o segundo eixo foram utilizadas como palavras-chaves “*wood panel*”, “*wood-based panel*”. O terceiro eixo está relacionado ao ciclo de vida, sendo composto pela palavra-chave “*life cycle*”. Com isso chegou-se a nove combinações possíveis com o cruzamento dos eixos para a pesquisa nas bases de dados disponibilizadas pela CAPES, eixos esses, apresentados no Quadro 1.

Quadro 1- Combinações de palavras-chave

Combinações de palavras-chave	
1	"circular economy" AND "wood based panel" AND "life cycle"
2	"circular economy" AND "wood-based panel" AND "life cycle"
3	"circular economy" AND "wood panel" AND "life cycle"
4	"industrial symbiosis" AND "wood panel" AND "life cycle"
5	"industrial symbiosis" AND "wood based panel" AND "life cycle"
6	"industrial symbiosis" AND "wood-based panel" AND "life cycle"
7	"industrial ecology" AND "wood-based panel" AND "life cycle"
8	"industrial ecology" AND "wood based panel" AND "life cycle"
9	"industrial ecology" AND "wood panel" AND "life cycle"

b) Definição das bases de dados e busca dos artigos com as palavras-chave

Para este estudo as bases de dados selecionadas para a realização das buscas foram *Web of Science*, *Scopus* e *ScienceDirect*, as quais indexam artigos mais alinhados ao tema proposto nesta pesquisa.

As buscas foram realizadas utilizando as combinações de palavras-chave dispostas no Quadro 1, tendo como delimitação temporal os últimos dez anos, pelo fato do tema nesta área ainda ser muito recente. A busca foi realizada no mês de setembro de 2018. Formando o portfólio bruto com 31 artigos.

Etapa 2:

c) Realização dos testes de aderência das palavras-chave

Com o portfólio de artigos já elaborado, foi realizado o teste de aderência das palavras-chave, o qual aleatoriamente foi selecionado dez artigos, a fim de identificar se a busca realizada abrangia a proposta do tema. No entanto, percebeu-se que os artigos retornados não estavam tão alinhados com o que se buscava, fazendo-se necessário a redefinição das palavras-chave. O eixo 1 ficou composto apenas por "*circular economy*", pois a economia circular já engloba as demais anteriormente consideradas. O eixo 2 continuou sendo composto pelas palavras "*wood panel*" e "*wood-based panel*" exceto "*wood based panel*", pois os artigos retornados são semelhantes quando se usa "*wood-based panel*". O terceiro eixo ficou formado pelas palavras-chave "*Ica*" e "*life cycle assessment*", abrangendo artigos que somente "*life cycle*" não retornava. A segunda busca ocorreu no mês de março de 2019, sem delimitação temporal.

A Tabela 1 apresenta os cruzamentos entre os eixos utilizados na segunda busca e o número de artigos retornados em cada base.

Tabela 1- Combinações de palavras-chave

Palavras-chaves	Base de dados	Número de artigos
("circular economy" OR "lca") AND "wood-based panel"	Scopus	20
	Web of Science	5
	ScienceDirect	7
("circular economy" OR "lca") AND "wood panel"	Scopus	15
	Web of Science	9
	ScienceDirect	5
("circular economy" OR "life cycle assessment") AND "wood based panel"	Scopus	21
	Web of Science	9
	Science Direct	8
("circular economy" OR "life-cycle-assessment") AND "wood-based panel"	Scopus	21
	Web of Science	6
	ScienceDirect	8
Total		134

Etapa 3:

d) Filtragem de artigos

Para a filtragem dos artigos alguns aspectos foram levados em consideração, tais como: (1) artigos duplicados; (2) alinhamento dos títulos e palavras-chave com o presente tema; (3) alinhamento do resumo com o tema; e; (4) alinhamento do artigo na íntegra com o tema.

Inicialmente, os artigos localizados nas buscas foram exportados para o gerenciador bibliográfico *Mendeley* 1.19.2, possibilitando identificar e excluir artigos duplicados, fase na qual o portfólio bruto reduziu de 134 para 34 artigos para análise de alinhamento de títulos.

Após a exclusão dos artigos duplicados, realizou-se a leitura dos títulos dos artigos com o objetivo de verificar o alinhamento ao tema pesquisado, onde apenas cinco artigos foram considerados irrelevantes, sendo assim excluídos, permanecendo então 29 estudos.

Em seguida, realizou-se a leitura dos títulos e palavras-chave dos artigos a fim de identificar o enquadramento dos artigos com o tema pesquisado, permanecendo 21 estudos alinhados ao tema desta pesquisa. Considerando nesta etapa, os artigos que tratam assiduamente dos temas ligados à economia circular e avaliação do ciclo de vida em painéis de madeira, para análise da relevância.

Finalizando a etapa de exclusão por títulos e palavras-chave, realizou-se a leitura na íntegra dos 21 artigos restantes, a fim de averiguar a existência de práticas de economia circular ou lacunas que possibilitassem a aplicação nas indústrias de painéis de madeira. Artigos considerados inadequados aos tópicos deste estudo foram descartados. As razões para descartar artigos nesta etapa incluíram: não apresentar uma forte relação com os tópicos do presente estudo, ter interpretações equivocadas, apresentar, por vezes, abordagens superficiais e não apresentar contribuições significativas para o corpo da literatura investigada em consideração a literatura previamente existente. Sendo o portfólio bibliográfico final composto por 17 estudos, apresentados no Quadro 2.

Quadro 2- Portfólio final de artigos

Título	Autores	Painel	Estudo	Local de Aplicação
<i>Life Cycle Inventory of Medium Density Fibreboard.</i>	Rivela <i>et al.</i> (2007)	MDF	ACV	Espanha e Chile
<i>Life Cycle Assessment of Oriented Strand Boards (OSB): from Process Innovation to Ecodesign.</i>	Benetto <i>et al.</i> (2009)	OSB	ACV	Luxemburgo
<i>Environmental performance assessment of hardboard manufacture.</i>	Gonzales-Garcia <i>et al.</i> (2009)	HDF	ACV	União Europeia
<i>Life cycle assessment of medium density particleboard (MDP) produced in Brazil.</i>	Silva <i>et al.</i> (2013)	MDP	ACV	Brasil
<i>Do wood-based panels made with agro-industrial residues provide environmentally benign alternatives? An LCA case study of sugarcane bagasse addition to particle board manufacturing.</i>	Silva <i>et al.</i> (2014)	MDP	ACV	Brasil
<i>Comparative study of the life cycle assessment of particleboards made of residues from sugarcane bagasse (Saccharum spp.) and pine wood shavings (Pinus elliottii)</i>	Santos <i>et a.</i> , (2014)	MDP	ACV	Brasil
<i>Sustainable strategies analysis through Life Cycle Assessment: a case study in a furniture industry.</i>	Iritani <i>et al.</i> (2015)	MDP	ACV	Brasil
<i>Life cycle impacts of north american wood panel manufacturing.</i>	Bergman <i>et al.</i> (2015)	OSB	ACV	América do Norte
<i>Gate to gate life cycle assessment of flat pressed particleboard production in Islamic Republic of Iran.</i>	Kouchaki-Penchah <i>et al.</i> (2016)	MDP	ACV	República Islâmica do Irã
<i>Life cycle assessment of medium-density fiberboard manufacturing process in Islamic Republic of Iran.</i>	Kouchaki-Penchah <i>et al.</i> (2016)	MDF	ACV	República Islâmica do Irã
<i>Environmental assessment of bioproducts in development stage: The</i>	Freire <i>et al.</i> (2017)	MDF	ACV	Brasil

<i>case of fiberboards made from coconut residues.</i>				
<i>Life cycle assessment of medium-density fiberboard (MDF) manufacturing process in Brazil.</i>	Piekarski et al. (2017)	MDF	ACV	Brasil
<i>Wood-based composite made of wood waste and epoxy based ink-waste as adhesive: A cleaner production alternative</i>	Souza et al., (2018)	MDP	Produção +Limpa	Brasil
<i>Environmental aspects of oriented strandboards production. A Brazilian case study.</i>	Ferro et al. (2018)	OSB	ACV	Brasil
<i>Cross-country comparison on environmental impacts of particleboard production in Brazil and Spain</i>	Gonzales-Garcia et al. (2019)	MDP	ACV	Brasil/Espanha
<i>Life cycle assessment of plywood manufacturing process in China</i>	Jia et al. (2019)	Compensado	Gestão de resíduos	China
<i>Circular Economy Practices on Wood Panels: A Bibliographic Analysis.</i>	Araújo et al. (2019)	MDF/ MDF/OSB	Economia Circular	Brasil

Notando o maior número de artigos relacionados à ACV e a carência de estudos abordando a temática de economia circular em painéis de madeira, utilizou-se então o método classificado como “*Snowballing*”, a fim de complementar o portfólio bibliográfico, empregando como amostra de busca os estudos do Quadro 2.

O método do “*Snowballing*” é muito útil para encontrar estudos relevantes por meio de estudos selecionados através da aplicação de outros métodos, neste caso *Proknow-C*. Os artigos dispostos no Quadro 2 e, os selecionados pelo método *snowballing* (citados no decorrer deste estudo) foram suporte para compor o referencial teórico e os resultados.

2.3 CARACTERIZAÇÃO E MAPEAMENTO DO CICLO DE VIDA DOS PAINÉIS DE MADEIRA

As etapas de caracterização dos painéis de madeira e mapeamento do ciclo de vida foram embasadas em estudos encontrados na literatura. Por meio dos estudos, caracterizaram-se os painéis de madeira conforme as suas características e propriedades, indo desde a forma de fragmentação da madeira utilizada para compor o painel até a sua designação para o uso.

O mapeamento do ciclo de vida foi abordado em duas etapas:

- 1) A primeira etapa abrangeu todos os processos pertencentes ao modelo de produção das indústrias de painéis de madeira, encontrados na literatura, desde a etapa de obtenção de matéria-prima até os possíveis locais de descarte dos painéis pós-uso, com identificação das entradas e saídas de cada processo. Etapa esta, apresentada na seção de Referencial Teórico.
- 2) A segunda etapa foi desenvolvida por meio de dados coletados em estudos de casos, vídeos institucionais e relatório de sustentabilidade. Onde em cada etapa é descrito as entradas e saídas, além de práticas ambientais já adotadas pelas empresas. Etapa apresentada no capítulo de resultados e discussões.

2.4 PROCEDIMENTOS PARA COLETA E ANÁLISE DE DADOS

Os procedimentos utilizados para análise e coleta de dados foram separados em cinco etapas:

- Coleta de dados para diagnóstico do sistema produtivo de painéis de madeira;
- Coleta de dados para identificação dos principais *hotspots* do ciclo de vida de painéis de madeira;
- Identificação das práticas de economia circular no sistema produtivo de painéis de madeira;
- Coleta de dados para o cálculo do índice de circularidade em painéis de madeira.
- Modelos de negócios no sistema produtivo de painéis de madeira.

Nas seções subsequentes estão descritas cada uma das etapas listadas.

2.4.1 Sistema Produtivo de Painéis de madeira

Para a coleta de dados relacionados à etapa de sistema produtivo de painéis de madeira, utilizou-se como instrumento de pesquisas estudos de casos e vídeos institucionais de empresas de painéis de madeira, com o intuito de averiguar como é realizada a produção de painéis de madeira, incluindo as etapas de produção, e, insumos que entram e saem de cada etapa. Além, das perspectivas de uso e destinação final. Para esta etapa, utilizou-se também, o diagrama sistêmico (FUNDAÇÃO ELLEN MACARTHUR, 2017), o qual o ilustra o fluxo contínuo de

materiais técnicos e biológicos através do ‘círculo de valor’. Com este diagrama foi possível identificar as etapas do processo produtivo de painéis pertencentes ao ciclo biológico e técnico. Os passos descritos anteriormente foram realizados separadamente para cada classificação de painel (MDP, MDF e OSB), o estudo foi focado nesses três tipos, por possuírem maior utilização comercial no Brasil, relacionada à resistência física e mecânica que apresentam. Além do custo ser intermediário quando comparado a outros painéis de madeira. Os resultados obtidos nesta etapa estão apresentados na seção 4.1.

2.4.2 Principais *Hotspots* do Ciclo de Vida de Painéis de Madeira

Esta etapa de coletas de dados consistiu em investigar na literatura os principais impactos ambientais relacionados ao ciclo de vida de painéis de madeira, para isso, buscou-se dados em estudos de ACV aplicados em painéis de madeira reconstituída, foco do estudo. A busca foi concentrada em analisar as categorias de impacto utilizadas por cada pesquisador, a fronteira do sistema abordada em cada estudo e, os principais contribuintes de impactos ambientais. Os dados encontrados foram transferidos para tabelas subdivididas em seções, na seção de resultados, sendo as mesmas, correspondentes às categorias de impactos adotadas em cada estudo, etapas do processo produtivo dos painéis de madeira e, principais *hotspots* encontrados. A partir disso, a fase do ciclo de vida com maior impacto foi encontrada e principal *hotspots* de impactos identificados. Esta etapa se caracteriza como uma das principais fases deste trabalho, pois é através dos levantamentos encontrados na mesma, que será identificado, por modelos de negócios, onde a economia circular se encaixa, e como ela pode ser inserida. Os resultados obtidos nesta etapa estão apresentados na seção 4.2.

2.4.3 Práticas de Economia Circular no Sistema Produtivo de Painéis de Madeira

Esta fase de coleta de dados envolveu novamente os estudos de casos e os vídeos institucionais utilizados para a obtenção dos dados do sistema produtivo de painéis de madeira, além dos relatórios de sustentabilidade disponibilizados pelas

indústrias, a fim de constatar atividades ambientais por elas desenvolvidas que, se caracterizam práticas de economia circular. Com as informações obtidas, as mesmas foram relacionadas aos princípios de economia circular fornecido pela Fundação Ellen MacArthur (2017) e, as abordagens de economia circular que uma empresa deve considerar para se tornar circular, foram fornecidas pela norma BS 8001:2017 (THE BRITISH STANDARD INSTITUTION, 2017). Os resultados obtidos nesta etapa estão apresentados na seção 4.3.

2.4.4 Índice de Circularidade em Painéis de Madeira

Para o cálculo do índice de circularidade dos painéis de madeira, os dados de entradas de insumos para a fabricação dos painéis foram coletados nos estudos de ACV aplicados em painéis de madeira no Brasil (MDP: SILVA, 2012; MDF: PIEKARSKI, 2013; OSB: FERRO *et al.*, 2018). Após a coleta dos dados de insumos, os mesmos foram aplicados nas fórmulas disponibilizadas pelo indicador de circularidade MCI (*Material Circularity Indicator*) desenvolvido pela Fundação Ellen MacArthur (2015), a fim de identificar a circularidade de cada painel estudado, em variados cenários de reutilização, sendo que não se tem uma quantidade fixa de reutilização dos produtos. Nestes cálculos, também, foram desconsideradas as etapas que envolviam reciclagem, já que ainda não se tem estudos na literatura que apontam a reciclagem de painéis de madeira. O indicador utilizado no estudo foi selecionado por ter sido desenvolvido por uma fundação que desde 2010 tem a missão de acelerar a transição rumo à economia circular. Além de ter sido testada por uma gama de empresas líderes europeia. Os resultados obtidos nesta etapa estão apresentados na seção 4.4.

2.4.5 Modelos de Negócios no Sistema Produtivo de Painéis de Madeira

Com os dados obtidos anteriormente, notou-se ainda uma lacuna na relação entre o sistema produtivo de painéis de madeira e a economia circular, mediante a isso correlacionou-se as práticas identificadas com os modelos de negócios presentes no *CEO Guide to the Circular Economy* (2017), com o intuito de apontar se as práticas

se encaixavam nos modelos de negócios. O *CEO Guide* foi selecionado para a coleta dos modelos de negócios por oferecer as ferramentas necessárias para implementação dos princípios de economia circular. Os resultados obtidos nesta etapa estão apresentados na seção 4.5.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo apresenta a fundamentação teórica relacionada aos temas painéis de madeira (3.1), painéis de madeira reconstituída (3.2), cenários mercadológicos de PMR's no Brasil (3.3), ciclo de vida de PMR's (3.4), economia circular (3.5) e economia linear versus economia circular (3.6).

3.1 PAINÉIS DE MADEIRA

Os painéis de madeira são definidos como estruturas produzidas a partir de lâminas ou de diversos estágios de desagregação da madeira, tais como, partículas, fibras, lascas, entre outros, compactadas pela ação de pressão, temperatura e, aglutinação por meio de resinas sintéticas (BNDES, 2008).

As estruturas formadas a partir de lâminas ou sarrafos de madeira maciça são classificadas como painéis de madeira processada mecanicamente, sendo representados pelo compensado e, pelo painel colado lateralmente (EGP). Neste grupo também podem ser incluídos a madeira compensada laminada (LVL) e madeira laminada colada (MLC), muito utilizada na construção civil (THOEMEN, 2010).

Já as estruturas compostas por partículas, lascas ou fibras de madeira são denominadas painéis de madeira reconstituída. Este grupo é composto pelo aglomerado de partículas/ painéis de partículas de média densidade (MDP), painéis orientados (OSB), painéis de fibras de média densidade (MDF) e painéis de fibras de alta densidade (HDF). Esta categoria também engloba outros materiais compósitos menos utilizados, como madeira-cimento, madeira-plástico e outros materiais lignocelulósicos (THOEMEN, 2010).

Este estudo abordou às estruturas de madeira classificadas por painéis de madeira reconstituída, pelo fato de o Brasil ser destaque mundial na produção dos mesmos para uso em diversos setores, tais como, construção civil, embalagem e movelarias. O País reúne um número significativo de empresas de última geração que construíram versáteis e modernos parques industriais destinados à instalação de novas unidades, à atualização tecnológica das plantas já existentes, à implantação de linhas contínuas de produção e aos novos processos de impressão, de impregnação, de revestimento e de pintura (IBÁ, 2019).

Ainda os painéis adotados quanto a sua classificação são MDP, MDF e OSB. Ao MDP e MDF pela crescente demanda e utilização na indústria moveleira e construção civil, e o OSB pelas propriedades promissoras que o mesmo vem oferecendo, principalmente para a construção civil, por ser considerado um painel estrutural. Além disso, os painéis de madeira reconstituída são importantes fornecedores de matéria-prima para o setor moveleiro, o qual possui uma forte imagem no mundo devido ao alto nível de estética e técnica (IRITANI *et al.*, 2015).

3.2 PAINÉIS DE MADEIRA RECONSTITUÍDA

Os painéis de madeira reconstituída (PMR) são fabricados com base no processamento químico da madeira, que passa por diferentes processos de desagregação. Na maioria das vezes os painéis de madeira são divididos em: formados por partículas de madeira e os compostos por madeira em estágio ainda mais avançado de desagregação, fibras. Basicamente, o processo produtivo dos painéis de madeira, constitui-se em reduzir a madeira em pequenos pedaços, mesclados com resinas e, compactados com ação de pressão e temperatura, formando o colchão de madeira (BNDES, 2013). Os principais painéis que representam este grupo são apresentados e descritos no Quadro 3.

Quadro 3- Classificação e característica dos PMR's

Classificação	Características
MDP	O painel de MDP é composto por uma matriz adesiva sintética (geralmente a ureia-formaldeído) e uma fase de reforço composta de partículas de madeira, que são combinadas pela aplicação de calor e pressão na consolidação do painel. As partículas de madeira são dispostas em três camadas ligadas por um agente ligante; emulsão de parafina, que melhora as propriedades higroscópicas do painel; e um catalisador (cloreto de amônio/sulfato), cuja função é acelerar a cura da resina durante o ciclo de prensagem (SILVA <i>et al.</i> , 2013).
MDF	MDF é um produto constituído por madeira desagregada, sendo a madeira decomposta em fibras de madeira e compactadas com cera ou resina, aplicando altas temperaturas e pressões. O MDF é mais denso que o MDP e é usado principalmente em marcenarias e no projeto de arquitetura de interiores (PIEKARSKI <i>et al.</i> , 2017). Seus correlatos são o HDF (<i>High Density Fiberboard</i>) e SDF (<i>Super Density Fiberboard</i>), que se caracterizam por possuir alta densidade. (BNDES, 2008; ABIPA, 2013).
OSB	O OSB é um painel formado por partículas (lascas) de madeira orientada, e coladas com resina sintética à prova d'água e consolidadas sob ação de calor e pressão (FERRO, <i>et al.</i> 2018). As partículas que compõe o artigo e a forma de estruturação conferem ao OSB excelentes propriedades mecânicas que permitem a utilização em diversas áreas, especialmente na construção civil, além de revestimentos de paredes e painéis de teto (REBOLLAR <i>et al.</i> , 2007; BENETTO <i>et al.</i> , 2009).

Chapas de Fibras	A chapa de fibra é uma chapa de espessura fina, resultado da prensagem a quente de fibras de madeira a partir de um processo úmido, que reativa os aglutinantes naturais da madeira, sem a necessidade de adição de resinas sintéticas, conferindo ao painel alta densidade. No Brasil, utiliza-se madeira de florestas plantadas (BNDES, 2008; ABIPA, 2013).
------------------	---

Segundo o Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social/BNDES (2013), os PMR quando comparados à madeira maciça e ao compensado apresentam diversas vantagens:

- i. Aproveitamento da tora relativamente integral;
- ii. Utilização das toras de pequenos diâmetros;
- iii. Possibilidade de utilização de resíduos;
- iv. Produção de painéis de grandes dimensões;
- v. Caracterizar-se pela disposição aleatória das partículas, que minimizam o fator anisotrópico que a madeira possui, e;
- vi. Facilidades de impregnação com produtos repelentes a agentes xilófagos (cupins) e insetos (vespas), umidade e retardantes de fogo (aditivos).

Ressalta-se também, que os PMR apresentam a vantagem de serem comercializados in natura, pintados ou revestidos (maior valor agregado). A princípio a produção crua acontece, sem adição alguma de revestimentos ou tintas, mas depois podem receber a adição destes materiais pela indústria moveleira.

Destacam-se, como principais PMR's utilizados o painel de MDP, MDF e OSB. As seções subsequentes apresentam as características destes painéis de madeira.

3.2.1 Painéis *Medium Density Particleboard* (MDP)

A sigla MDP vem de *Medium Density Particleboard*, e refere-se ao painel de partículas de média densidade, produto derivado da madeira (SILVA, 2012). Destaca-se por ser um painel com densidade entre 551 kg/m³ e 750 kg/m³ constituídos de partículas de madeira aglutinadas com resina sintética termofixa, que se consolidam sob ação conjunta de calor e pressão (ABIPA, 2013). A Figura 3 traz um exemplo de painel de MDP.

Figura 3- MDP**Fonte: Berneck (2018)**

O painel de MDP é também conhecido como aglomerado, no mundo, a matéria-prima mais empregada são resíduos de madeiras de qualidade inferior, já no Brasil, são utilizadas madeira de florestas plantadas, destacando a madeira de eucaliptos e pinus.

A partir da década de 1990, as indústrias de aglomerado começaram a investir em modernização tecnológica, mudando de prensagem cíclica para contínua, conferindo ao painel melhores resistência, com isso, houve a modificação de nomenclatura para MDP, com o intuito de diferenciar do aglomerado tradicional (BNDES, 2013).

No painel de MDP, as partículas são posicionadas de forma diferenciada (Figura 4), as de maiores dimensões dispostas ao centro e, as de menores nas superfícies externas, compondo assim as três camadas do painel. As partículas são aglutinadas com resina sintética e, compactadas através de pressão e temperatura em prensa contínua.

Segundo Maloney (1993) e Moslemi (1974), partículas com dimensões menores requerem maior consumo de resina, tendo em vista a maior área superficial específica para o encolamento adequado das partículas. Com a aplicação de mesma quantidade de resina, o painel produzido com partículas maiores, apresentará maior ligação interna, tendo em vista sua menor área superficial específica e, conseqüentemente, maior disponibilidade de resina por unidade de área.

Figura 4- Distribuição das camadas de MDP



Fonte: Silva (2012)

Os painéis são produzidos com madeira de reflorestamento, tais como, Pinus (Taeda e Elliotti- Sul, *Caribea-Hondurensis* e *Oopacarta* - Sudeste/Norte/Nordeste) e *Eucalyptus* (*Grandis*, *Saligna*- Sul/ Sudeste), além da utilização de Acácia negra no Sul (ABIPA, 2010; IWAKIRI, 2005).

De acordo com a norma ABNT NBR 14.810:2013, os painéis de partículas de média densidade, são classificados pela aplicação e, condição de uso:

- P2-Painéis para uso interno em condições secas;
- P3-Painéis não estruturais para uso em condições úmidas;
- P4-Painéis estruturais para uso em condições secas;
- P5-Painéis estruturais para uso em condições úmidas;
- P6-Painéis estruturais para uso em condições severas de carga, em condições secas;
- P7-Painéis estruturais para uso em condições severas de carga, em condições úmidas.

O processo de produção do painel MDP compreende as etapas de descascamento da tora, fragmentação, produção de partículas, secagem das partículas, seleção das partículas, encolagem, produção do colchão, prensagem e resfriamento, seccionamento e lixamento. Cada etapa está descrita subsequentemente.

Inicialmente as toras chegam ao pátio da fábrica normalmente por transporte rodoviário e são armazenadas. Em seguida se inicia a etapa de descascamento, que ocorre em um grande tambor rotativo que solta às cascas através do impacto das toras entre si. As cascas seguem para a planta térmica e a tora descascada para o processo de desagregação.

A etapa de desagregação da tora inicia-se no picador, onde a ocorre a transformação da madeira, de tora para cavacos/ chips com dimensões médias de 50 x 50 x 4 mm. Os cavacos, então são destinados a silos de armazenamentos, a fim de proteger os cavacos de intempéries, tal como, umidade.

Do silo de armazenamento os cavacos seguem para o processamento em equipamentos designados moinho martelo ou de disco. Nesta etapa os cavacos são reduzidos a partículas denominadas *flakes*. A umidade em que a madeira se encontra é muito importante, pois o teor de umidade, abaixo de 35% dificulta no controle das geometrias das partículas, gerando grande quantidade de “finos”. Por outro lado, a madeira em condições saturadas, tende a resultar no esmagamento da madeira (IWAKIRI, 2005).

Com as partículas já disponíveis, estas seguem para a etapa de secagem em equipamentos denominados secadores rotativos e permanecem até atingirem umidade inferior a 3% na saída do secador. O tempo de secagem depende da densidade da madeira, pois quanto maior a densidade maior será o tempo de secagem, podendo variar de 1 a 3 minutos (IWAKIRI, 2005; IRLE, 2012).

Nesta etapa, ainda, a forma e tamanho das partículas influenciam diretamente na quantidade de calor necessário para atingir a umidade final desejada. As partículas maiores necessitam de alta temperatura para eliminar um determinado peso de água adicional, enquanto as partículas menores apresentam maior área superficial em exposição, resultando em maior quantidade de evaporação de água (IWAKIRI, 2005). Geralmente a temperatura utilizada para a secagem das partículas é em média 180°C.

Finalizada a secagem, as partículas seguem para o processo de seleção para:

a) Eliminação das partículas mais finas, pó de madeira e impurezas da massa, pois estas consomem alto teor de adesivo e diminuição da resistência das chapas (IWAKIRI, 2005);

b) Estabelecer limites nas dimensões das partículas selecionadas para o processo, denominadas “aceitas” na indústria. As partículas fora do padrão determinado retornam para o processo para serem reduzidas a dimensões apropriadas, ou são eliminadas. As partículas secas são classificadas em peneiras vibratórias (classificador de peneiras) e classificadores pneumáticos (multiciclones). As dimensões adequadas são separadas para utilização, sendo as menores para compor a camada externa e, as maiores para a interna, os finos e impurezas são descartados (IWAKIRI, 2005).

Com a seleção das partículas já realizada, as mesmas seguem para o processo de encolagem com adesivo sintético (Ureia-formaldeído) combinado com catalisador (sulfato de amônia) e emulsão parafina, que proporcionam ao painel melhores propriedades. A quantidade de adesivo varia de 6% a 12% em relação ao peso das partículas secas (BARROS FILHO, 2009) e, a emulsão de parafina até 1% do peso do resíduo sólido (IWAKIRI, 2005).

As partículas já homogeneizadas seguem para as formadoras, as quais distribuem os materiais de cada camada. Sendo então o colchão formado, pelas partículas de CI, região central (miolo) e de CE's dispostas nas camadas externas do painel, totalizando três camadas. O colchão é formado em esteiras contínuas, que o encaminha para a etapa de pré-prensagem. Na pré-prensagem o colchão passa pela redução da altura, a fim de melhorar a consistência e facilitar o processo de carregamento da prensa a quente.

Em seguida, o colchão é levado para a prensagem a quente para a cura da resina, densificação e consolidação do colchão até que este atinja a espessura final (IWAKIRI, 2005). O tempo de prensagem de um painel depende do tempo em que a linha de cola mais interna do painel atinja a temperatura de cura da resina (CHOW, 1973). Na saída da prensa, há serras que operam diagonalmente e longitudinalmente, em velocidade combinada ao avanço da esteira que transporta o painel, que corta os painéis. As serras longitudinais operam no sentido do comprimento, a fim de retirar as rebarbas e lascas soltas (SILVA *et al.*, 2013).

Logo, os painéis são resfriados e acondicionados por 48 horas, até atingirem a temperatura e umidade de equilíbrio do ambiente. Por fim, os painéis são lixados, a fim de padronização da espessura e acabamento superficial, proporcionando às condições necessárias a superfície, viabilizando o processo de revestimento. No entanto, nem sempre os painéis lixados são revestidos, sendo que 40-60% da produção é vendida in natura (SILVA, 2012).

3.2.2 Painéis *Medium Density Fiberboard* (MDF)

Os painéis de fibras de média densidade (500 a 800 kg/m³) são produtos homogêneos, uniformes, estável, com superfície plana e lisa, com boa trabalhabilidade, alta usinabilidade para encaixar, entalhar, cortar, parafusar, perfurar

e moldurar, proporcionando economia no uso de tintas e vernizes (IWAKIRI, 2005). Devido à densidade adequada e homogeneidade proporcionada pelas fibras, o painel de MDF pode ser facilmente torneado, entalhado e usinado (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PAINÉIS DE MADEIRA – ABIPA, 2012b, p.1). A Figura 5 apresenta a chapa de painel de MDF.

Figura 5- Painel MDF



Fonte: Berneck (2018)

O processo produtivo do MDF é semelhante ao MDP, com a diferença de que as partículas são cozidas, proporcionando a madeira um maior grau de desagregação (fibras). Este painel possui elevado consumo de madeira e resina por metro cúbico quando comparado ao MDP, tornando assim, seu custo mais elevado (BNDES, 2013).

O MDF se destaca em relação ao MDP, pois suas características mecânicas se aproximam ao da madeira maciça, permitindo grande usabilidade, usos e aplicações versáteis do que o painel de partículas (BNDES, 2013). Em comparação com o MDP, o painel de MDF é mais denso e usado, maiormente nas marcenarias e móveis de arquitetura para interiores (PIEKARSKI *et al.*, 2017).

De acordo com a norma ABNT NBR 15316:2009- Chapas de fibras de média densidade são classificadas por densidade, aplicação e condição de uso:

a) Classificação dos painéis MDF por densidade:

- HDF: $\geq 800 \text{ kg/m}^3$;
- Standard: $> 650 \text{ kg/m}^3$ e $< 800 \text{ kg/m}^3$;
- Light: $> 550 \text{ kg/m}^3$ e $\leq 650 \text{ kg/m}^3$;
- Ultra light: $> 450 \text{ kg/m}^3$ e $\leq 550 \text{ kg/m}^3$.

b) Classificação dos painéis MDF por aplicação:

- Uso geral;
- Uso estrutural.

c) Classificação dos painéis MDF por condição de uso:

- Condição seca;
- Condição Úmida.

Os painéis de MDF são frequentemente utilizados nos setores de fabricação de móveis residenciais e comerciais além da arquitetura de interiores do setor imobiliário, sofrendo assim alta pressão para a redução de impactos ambientais e à saúde humana (PIEKARSKI *et al.*, 2017).

Dentre as várias vantagens que justificam o emprego dos painéis de MDF, pode-se destacar a boa resistência específica, elevada disponibilidade de matéria-prima, associada ao aspecto renovável da fonte, reciclabilidade e menor demanda energética para a produção, transporte e instalação (BOM, 2008).

O processo produtivo deste painel inclui as etapas: descascamento da tora, fragmentação, classificação dos cavacos, lavagem, tratamento de cavacos, desfibramento, mistura de resina, secagem das fibras, armazenamento, produção do colchão, seccionamento, prensagem e resfriamento e lixamento. Cada etapa está descrita subsequentemente:

As toras chegam ao pátio da indústria e seguem para o processo de descascamento, onde a casca é retirada e segue para o armazenamento da planta térmica. A tora descascada é então fragmentada, gerando cavacos pelo processamento em picadores. Os cavacos então são direcionados a uma peneira classificatória, pois não se é possível obter cavacos de tamanhos uniformes. Os cavacos com dimensões maiores são separados e retornados ao picador.

Posterior à seleção, os cavacos são lavados a fim de remover as impurezas e em seguida destinados ao processo de desfibramento, onde inicialmente são aquecidos em um digestor com vapor pressurizado em temperatura entre (170-180°C) e tempo 2-5 min (as fibras são obtidas por desfibriladores mecânicos ou por meio de aumento de pressão (método menos utilizado)). Em seguida, os cavacos então, são direcionados aos desfibriladores e, por ação de força centrífuga são lançadas as superfícies dos discos, e reduzidos mecanicamente através de cisalhamento, transformando em fibras (BNDES, 2010; IWAKIRI, 2005).

Na etapa de aplicação de cola nas chapas de MDF existe uma pequena diferença quando comparada com as demais chapas, no qual, os aditivos, catalizador e cola (geralmente ureia-formaldeído) são aplicados nas fibras por meio de processo

de encolagem pressurizada (“*blowline*”), o que permite a aplicação eficiente da resina na superfície externa das fibras (BELINI; TOMAZELLO FILHO, 2010).

Após a aplicação da resina e aditivos, as fibras são secas em tubos secadores, de ar quente para remoção da umidade, posterior a secagem as fibras com umidade entre (7 a 9%) passam pelo filtro a vento (*Sifter*) a fim, de remover os grumos. As fibras selecionadas seguem para um silo alimentador que faz a distribuição uniforme das fibras em uma manta formadora (PIEKARSKI, 2013).

Nesta etapa, a manta de fibras passa pelo processo de remoção de ar (contido entre as fibras) e, finalmente, a manta é pré-comprimida. A manta de fibras é umedecida em sua superfície superior e inferior para entrada na prensa contínua.

O processo de prensagem apresenta gradiente decrescente de temperatura entre as fases de entrada da manta de fibras e saída dos painéis de MDF. As temperaturas maiores no início da prensagem promovem a cura mais eficiente da resina, a qual aumenta a dureza superficial do painel, resultando em painéis MDF com melhores propriedades de módulo de ruptura, módulo de elasticidade e resistência à tração superficial e, menores valores de inchamento e absorção 24 horas (BELINI; TOMAZELLO FILHO, 2010).

O resfriamento do painel é realizado para evitar variações dimensionais da chapa pós-aquecimento e, geralmente são resfriados a temperatura ambiente, protegidos das intempéries, sendo que o tempo depende do tipo da linha de formação utilizada.

Os painéis já resfriados seguem então, para o processo de acabamento, o qual segue a sequência de corte, lixamento e revestimento. O corte é feito para estabelecer as medidas padrões; o lixamento para a preparação da superfície das chapas, para acabamentos finais, tais como, revestimentos (CAMPOS, 2002).

3.2.3 Painéis *Oriented Strandboard* (OSB)

Com crescente demanda no país o *Oriented Strandboard* (OSB), é um painel formado de lascas orientadas, sendo o miolo defasado em 90° das camadas externas, coladas a partir de resinas sintéticas e consolidadas por ação calor e pressão (IWAKIRI, 2005). A Figura 6 apresenta exemplos de painéis de OSB.

Figura 6- Painel OSB**Fonte: LP Brasil (2018)**

Nos últimos anos este painel vem ocupando uma faixa de mercado antes ocupada pelo compensado, com capacidade mundial em 2017 de 30x106 m³, apresentando propriedades mecânicas altamente satisfatórias.

O OSB é classificado como estruturas fabricadas a partir de lascas orientadas que apresenta como principal característica, elevada resistência mecânica, o que justifica sua grande utilização em diversas áreas, especialmente na construção civil, como por exemplo, em bases de paredes e forros, tapumes, divisórias, decks, plataformas, almas de vigas estruturais “I”, além de revestimento de paredes e painéis de teto (CSA, 1993; IWAKIRI, 2005; BENETTO *et al.*, 2009).

No setor moveleiro este tipo de painel ainda é desconhecido, no entanto as características que o mesmo apresenta, poderia suprir as lacunas não atendidas pelas chapas comumente utilizadas para este fim (REBOLAR; PÉREZ; VIDAL, 2007). Ainda segundo este autor, uma das principais características do painel de OSB é o tamanho das partículas que compõe a chapa e a orientação intencional dessas partículas, que confere ao painel alta estabilidade mecânica no eixo longitudinal.

A produção da chapa se dá a partir da organização das partículas, sendo orientado em uma mesma direção em três camadas diferentes, consolidado através de uma prensagem a quente, o que garante uma maior resistência e estabilidade dimensional desses painéis (MALONEY, 1993).

O painel OSB se destaca por permitir em seu processo produtivo a redução da disponibilidade de toras de boa qualidade para laminação, utilização de toras de qualidade inferior e de espécies de baixo valor comercial, bem como espécie de rápido crescimento (IWAKIRI, 2005). A engenharia de OSB foi arquitetada para oferecer resistência mecânica superior, grande durabilidade e excelente trabalhabilidade.

Segundo a norma EN 300, os painéis OSB são classificados da seguinte forma:

- OSB/1: Painéis para usos gerais e para componentes interiores (incluindo mobiliário) utilizados em ambiente seco;
- OSB/2: Painéis para fins estruturais utilizados em ambiente seco;
- OSB/3: Painéis para fins estruturais utilizados em ambientes úmidos;
- OSB/4: Painéis para fins estruturais especiais utilizados em ambientes úmidos.

De acordo com Iwakiri (2003) o sistema produtivo de painéis OSB envolve as seguintes etapas: conversão e condicionamento das toras; descascamento das toras, fragmentação em partículas *strands*, armazenamento das partículas úmidas, secagem das partículas, aplicação dos adesivos e aditivos químicos; formação do colchão; pré-prensagem e prensagem a quente; acabamento e acondicionamento. Cada etapa está descrita continuamente:

Inicialmente as toras são acondicionadas em tanques com água quente por um período de 3 a 15 horas, com temperatura variando entre 30° e 70°C. Este procedimento tem por intuito amolecer a madeira e, conseqüentemente reduzir o consumo de energia e geração de finos no processo de operação dos picadores.

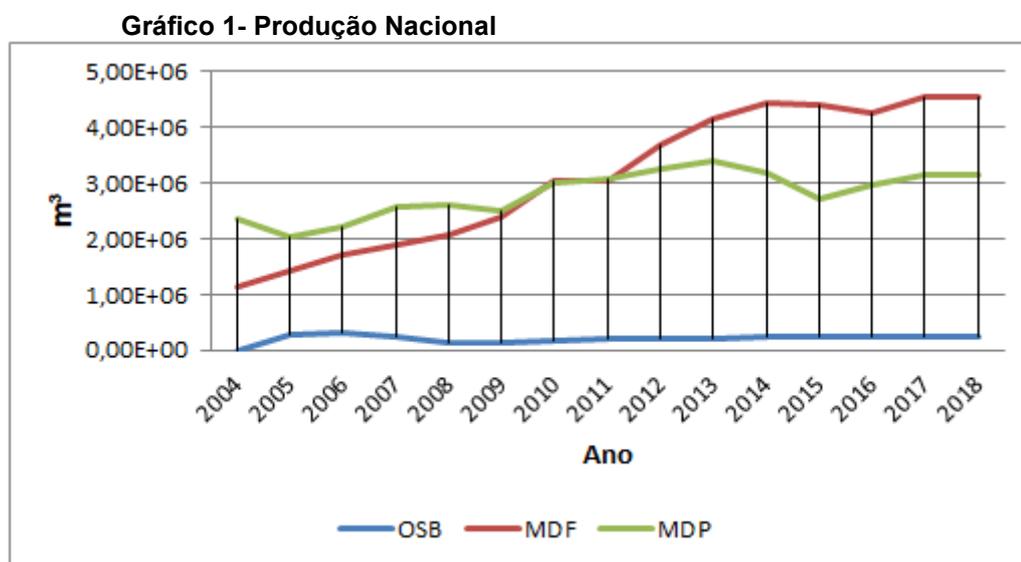
As toras são descascadas, em descascadores do tipo tambor e anel. As toras descascadas seguem então para o processo de geração das partículas, o qual os equipamentos mais utilizados são os picadores de disco ou cilindro. As partículas são secas em tambores giratórios até atingirem o teor de umidade final adequado com o tipo da resina que será empregada na fabricação. Antes de serem coladas, as partículas seguem para classificação em peneiras, para remoção de pequenos materiais. No processo de colagem, as partículas são borrifadas com resina e posteriormente seguem para a encoladeira para a mistura do adesivo. Finalmente, as partículas são transportadas para a formação do colchão, com lascas cruzada perpendicularmente (ALBUQUERQUE; MENDES, 2000; IWAKIRI, 2005; NASCIMENTO; MORALES, 2008).

Posterior à formação do colchão, este segue para a prensa contínua de alta temperatura e pressão, onde será formado o painel. A prensagem visa à consolidação do colchão de partículas em um painel de densidade e espessura desejada. Nesta etapa também, ocorre à cura da resina unindo as partículas e, estabiliza o painel, pela ação do calor. Após, os painéis são cortados nas dimensões comerciais (IWAKIRI, 2005).

3.3 CENÁRIO MERCADOLÓGICO DE PMR's NO BRASIL

Os painéis de madeira industrializada, ou reconstituída (PMR), são painéis cuja demanda vem crescendo, sendo a taxa mais elevada no país. Neste cenário destacam-se o MDF-HDF com aproximadamente $4,1 \times 10^7$ m³ de chapas produzidas e o MDP com 3×10^6 m³. É uma indústria que possui cerca de dez produtores instalados no país cuja oferta vem crescendo em ritmo ainda mais vigoroso do que a demanda. Já a utilização de OSB no país segue em patamares reduzidos, sendo que a única planta no Brasil, opera a 350.000 m³/ano. Destaca-se sua utilização na construção civil, devido a sua resistência, sendo substituto do compensado (BNDES, 2013).

Segundo a Indústria Brasileira de Árvores (2017) o segmento de painéis de madeira nacional ocupou em 2016 o 8º lugar no ranking mundial dos maiores produtores. Neste mesmo ano a produção de painéis de madeira reconstituída apresentou queda de 2,4% em relação ao ano de 2015. A produção de MDF diminuiu 8,8%, enquanto a produção de MDP aumentou 8,9%, sendo apresentado pelo Gráfico 1.

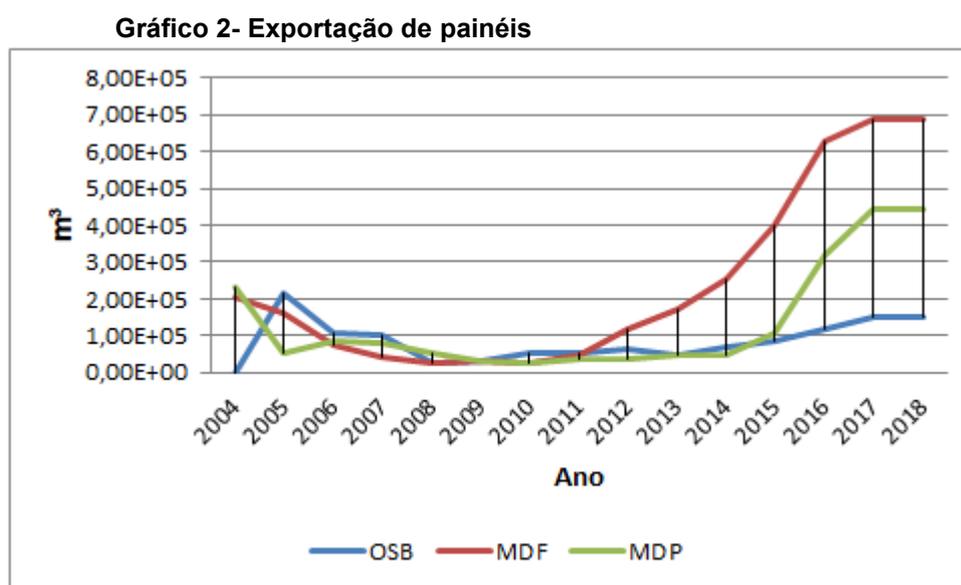


Fonte: FAO STAT (2018)

Segundo os dados dispostos no Gráfico 1 nota-se que a produção de painéis de madeira reconstituída evoluiu consideravelmente, pela sua grande participação no mercado interno e aos investimentos em novas tecnologias para a fabricação dos mesmos (BNDES, 2008). Percebe-se também que o painel de MDP dominava a produção de painéis de madeira reconstituída, no entanto, no ano de 2009 a produção

de painéis de MDF e derivados começaram a se equiparar a de MDP, e a partir de 2011, a superou, isso se explica pelas melhores propriedades que o painel de MDF apresenta em relação ao MDP. Já a produção de OSB percebe-se que ainda é bem recente no Brasil, tendo uma capacidade de produção baixa em relação aos demais painéis, mas com grande potencial de crescimento devido às características e propriedades que apresentam.

Entretanto, no ano de 2016, os painéis de madeira tiveram queda na venda doméstica, e como consequência da retração, a queda nas vendas de produtos que utilizam painéis de madeira em sua composição, sendo incluso, os móveis, principal consumidor de painéis de madeira no Brasil. Para compensar a queda do mercado interno, o setor alocou a produção no mercado externo e as exportações atingiram 1,1 milhões de m³, aumento de 64% em relação a 2015 (IBÁ, 2017), como demonstrado no Gráfico 2.



Fonte: FAO STAT (2018)

Ainda de acordo com a Figura 9 percebe-se que a exportação de painéis de MDP permaneceu desestabilizada até 2014, onde a partir de 2015 houve crescimento acelerado e, a exportação de chapas de MDF-HDF se estabilizou a partir de 2011, aumentando consideravelmente nos anos seguintes. Esse aumento se deve ao painel de MDF apresentar características superiores ao MDP, principalmente para a indústria moveleira. Características estas apontadas pela melhor trabalhabilidade em relação ao arredondamento de laterais, ou recorte para ganhar formas diferenciadas, como

curvas e outros desenhos, pois é considerado mais plástico que o MDP, também, apresenta superfícies mais lisas, o qual é mais indicado para receber pintura.

Como já notado anteriormente no Gráfico 1, o Brasil é um recente produtor de painéis de OSB, possuindo capacidade instalada ainda baixa, enfrentando assim algumas dificuldades em se estabilizar no mercado de exportações, firmando-se neste mercado no ano de 2014.

O representativo aumento na produção do segmento brasileiro de painéis de madeira (MDP, MDF-HDF, OSB), deve-se especialmente pelas suas diversas aplicabilidades, apresentada pelo Quadro 4, sendo na maioria das vezes substitutos de outros produtos madeireiros (APRE, 2018).

Quadro 4- Uso e aplicações de PMR's

Classificação dos painéis de madeira	Painéis de Partículas	Painel de Fibra
		
Usos e aplicações de painéis de madeira reconstituída		
Construção civil	Pisos, paredes, vigas l, escadas, forros, coberturas, tapumes, divisórias, barracões, lambris, portas e outros.	Pisos, lambris, batentes, portas, divisórias, janelas, molduras, rodapés, perfis, escadas, forros, pisos, paredes e outros.
Móveis	Estruturas e armações de poltronas, laterais, tampos, prateleiras, portas, mesas, estantes, carteiras escolares, armários de cozinha, divisórias, encostos, assentos, fundos de gavetas/armários, camas e outros.	Móveis em geral, encostos, assentos, portas, mesas, estantes, camas, tampos, régua, detalhes, bancadas, fundos de armários e gavetas, encostos e outros.
Embalagens	Caixarias em geral, plataformas para pallets, carretéis industriais, caixas e gabinetes para a indústria de eletroeletrônicos, instalações comerciais e industriais, caixas e gabinetes pintados ou revestidos.	Carretéis industriais, caixas especiais, caixas e embalagens especiais.
Outros	Autofalantes, embalagens em geral, painéis para decoração, stands, brinquedos, placas, painéis, biombos e outros.	Assentos sanitários, brinquedos, placas, peças decorativas, peças e componentes para indústria automobilística.

Fonte: Adaptado de ABIMCI (2009)

As principais aplicações relacionadas aos painéis de madeira estão ligadas ao segmento da construção civil e a indústria de móveis. A escolha do painel de madeira está diretamente ligada as suas propriedades, as quais permitem variadas aplicações (ABIMCI, 2009). Ainda no Brasil, os pisos laminados, fabricados com PMR de alta densidade, adicionados de três camadas de revestimento, que fornecem:

resistência a riscos, abrasão e absorção de líquidos, estabilidade dimensional, e padrão decorativo vêm ganhando elevada popularidade (BNDES, 2013).

O uso de painéis de madeira reconstituída (MDP, MDF e OSB) é marcado pelo leque de aplicações recorrentes de suas resistências físico-mecânicas, e também pela geração de resíduos durante a fabricação dos produtos. Os painéis de MDP são utilizados tanto para a produção de móveis residenciais quanto comerciais, que não necessitem de usinagem em baixo relevo, entalhes de cantos arredondados, tais como: laterais de móveis, prateleiras, divisórias, tampos retos, tampos pós-formados, frente e laterais de gaveta (ABIPA, 2012), Figura 7. Além da aplicação em eletroeletrônicos, tapumes de construção civil e painéis de decoração (BERNECK, 2019).

Figura 7- Aplicações do MDP



Fonte: Eucatex (2019)

Quando usado sozinho ou combinado com outros painéis mais caros, um móvel feito de MDP será sempre muito mais econômico e competitivo do que os variados móveis feitos com outras matérias-primas similares, como compensado ou MDF (EUCATEX, 2019).

O MDF tem sido amplamente utilizado na indústria moveleira em frontais de portas, frentes de gaveta e outras peças mais elaboradas, com usinagens em bordas ou faces, como tampos de mesa, racks e estantes, assegurando excelentes resultados em todos os tipos de móveis para peças com usinagens profundas e trabalhos de baixo relevo, além de embalagens, aplicações na construção civil, artesanatos (ABIPA, 2008; BERBECK, 2019). Na construção civil é utilizado em pisos, rodapés, almofadas de portas, batentes, portas usinadas, peças torneadas como balaústres de escadas, pés de mesas, e também em embalagens (ABIPA, 2008). Além de estar sendo cada vez mais utilizadas em interiores de lojas, em vitrines, como

paredes, molduras arquitetônicas. A Figura 8 apresenta algumas das aplicações do MDF.

Figura 8- Aplicações do MDF



Fonte: Berneck (2019)

Já o painel de OSB possui sua principal aplicação na construção civil, devido suas características físico-mecânicas e boa instabilidade dimensional que permitem aplicações estruturais (FERRO, 2013). São empregados em pisos, forros, tetos, paredes, vigas, formas de concreto, batentes de portas, entre outros (PIVA, 2006). A Figura 9 apresenta a aplicação estrutural de painéis OSB.

Figura 9- Aplicação de OSB



Fonte: LP Brasil (2019)

3.4 CICLO DE VIDA DE PMR's

Na literatura dois conceitos de ciclo de vida podem ser encontrados. Um deles é o definido por Suomala (2004), como o período de tempo em que se inicia a concepção de um produto até não estar mais disponível para utilização, ainda determina que o ciclo de vida não se restrinja apenas ao produto, mais também as questões pós-venda e as atualizações do produto. A segunda abordagem é a ambiental, segundo a ISO 14040 (ABNT, 2009 a), ciclo de vida é definido como os

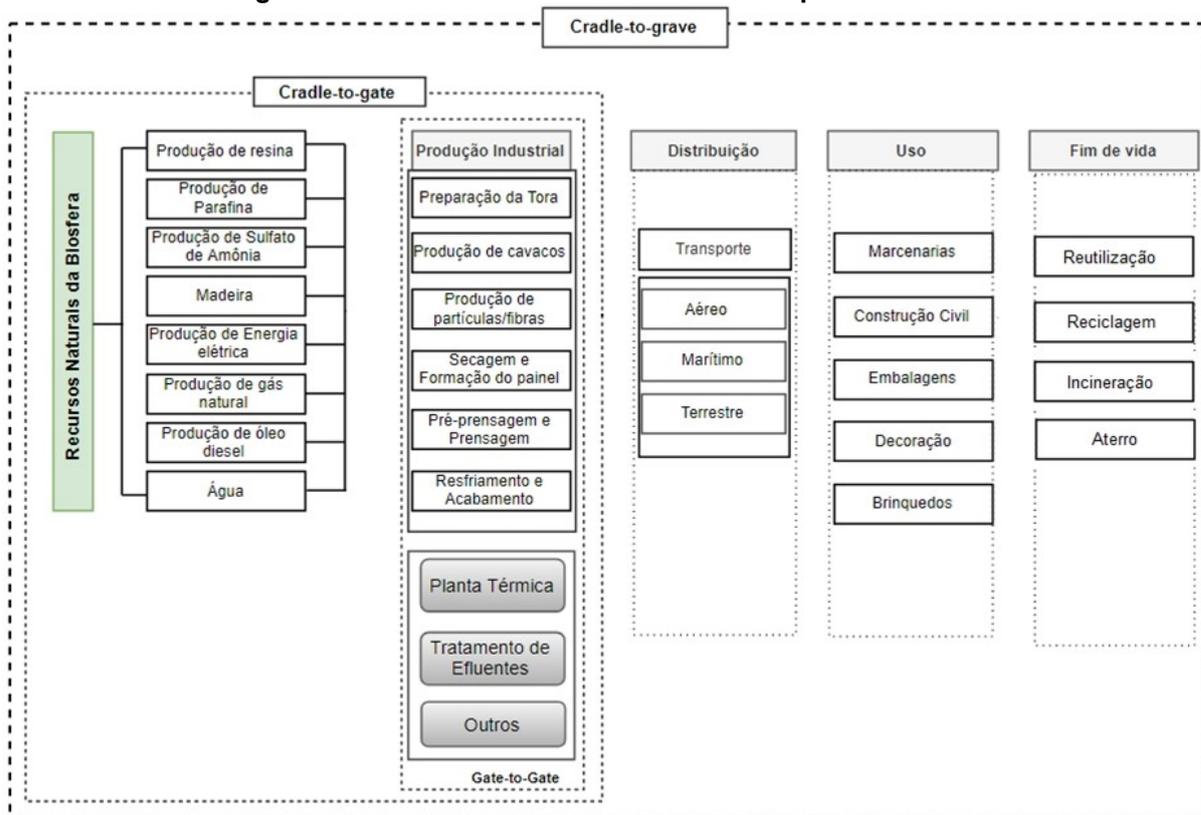
estágios consecutivos encadeados de um sistema de produto, desde a obtenção da matéria-prima ou sua geração a partir de recursos naturais até a disposição final. No caso deste estudo, a definição ambiental será abordada.

O ciclo de vida pode ser classificado em fronteiras do sistema (SILVA, 2012):

- *Cradle-to-grave* (do berço ao túmulo): Considera todas as etapas do ciclo de vida;
- *Cradle-to-gate* (do berço ao portão da fábrica): Considera todas as etapas do ciclo de vida até a fabricação, eliminando as etapas posteriores;
- *Gate-to-grave*: (do portão da fábrica ao túmulo): Considera apenas as etapas depois da fabricação, sendo distribuição, uso e disposição final do produto;
- *Gate-to-gate*: (do portão ao portão da fábrica): Considera apenas as etapas de fabricação do produto principal.

As etapas do ciclo de vida são definidas de acordo com o objetivo do estudo (ISO 14040). Neste presente estudo, visa-se analisar todas as etapas do ciclo de vida dos painéis de madeira de MDP, MDF e OSB, com o intuito de identificar as evidências de economia circular que possam se adequar ao processo produtivo dos painéis, com isso a fronteira do sistema escolhida para o trabalho é a *cradle-to-grave* (do berço ao túmulo). A Figura 10 demonstra o ciclo de vida dos painéis de madeira, adotando uma abordagem generalizada da produção.

Figura 10- Fronteiras do sistema do ciclo de painéis de madeira



Fonte: Autoria própria

Mediante a Figura 6 as fases do ciclo de vida dos painéis de madeira são identificadas junto às delimitações da fronteira do sistema. Cada etapa do ciclo de vida é composta de processos e, cada processo de entradas e saídas de produtos e emissões. Considerando a perspectiva do ciclo de vida *cradle-to-grave* apresentada tem-se a divisão de subsistemas em: Recursos naturais, Produção Industrial, Uso e Fim de vida.

3.4.1 Recursos da Biosfera

A fase de recursos naturais é marcada pela obtenção de matéria-prima de fontes renováveis e não renováveis dispostos na natureza. Segundo Portugal (1992) a palavra recurso significa onde recorrer para a obtenção de algo, a fim de satisfazer as suas necessidades.

Recurso natural pode ser definido como qualquer elemento ou aspecto da natureza que possua demanda e seja passível de uso. Os recursos podem ser classificados em função da sua demanda na natureza em renováveis e não renováveis (RODRIGUES, 2015). Recursos considerados renováveis são aqueles

que são repostos ou regenerados de forma espontânea pela natureza como, por exemplo, a energia do sol, a água e o ar, apesar de terem a capacidade de se reestabelecerem naturalmente, eles não são ilimitados. Por outro lado, os recursos não renováveis são aqueles que quando extraídos ou utilizados por um período determinado de tempo, não se regeneram naturalmente (MMA, 2019).

Assim, os recursos utilizados na produção de painéis de madeira pertencem tanto ao grupo de matéria-prima renovável quanto não renovável, de acordo com as definições, os recursos são classificados no Quadro 5, logo em seguida são descritas sua produção/obtenção, consecutivamente.

Quadro 5- Classificação dos recursos utilizados na produção de painéis de madeira

Recursos	Classificação
Água	Renovável
Resina	Não Renovável
Parafina	Não Renovável
Gás natural	Não Renovável
Energia elétrica	Não Renovável e Renovável
Óleo Diesel	Não Renovável
Óleo GLP	Não Renovável
Madeira	Renovável

As resinas mais utilizadas para a compactação dos materiais que compõe os painéis de madeira são produtos provenientes da reação entre ureia, melamina ou fenol com formaldeído, sendo classificados como resinas ureia-formaldeído (são produzidas em solução aquosa, com teor de sólidos entre 60 e 70%, apresentam coloração branca leitosa, PH na faixa de 7,4 a 7,8 e viscosidade na faixa de 400 a 1000 cP à 25°C), fenol-formaldeído (apresenta coloração marrom avermelhado, teor de sólidos entre 48 e 51%, pH na faixa de 11 a 13, viscosidade entre 300 e 600 cP e temperatura de cura na faixa de 130 a 150°C) e melamina-formaldeído (apresenta coloração branca leitosa, possui maior resistência à água que a UF e cura mais rápida com relação a FF) (IWAKIRI, 2005). Essas resinas são provenientes de matéria-prima fóssil como gás natural e óleo cru, os quais advêm de fontes não renováveis, representando também uma preocupação ambiental (CHIPANSKI, 2006).

A parafina usada na confecção de painéis de madeira tem por finalidade aumentar estabilidade dimensional, reduzindo a higroscopicidade dos mesmos (IWAKIRI, 2005). Este componente é obtido através da mistura de hidrocarbonetos

saturados de alto peso molecular obtida pelo refino de óleos lubrificantes. Possuem seus átomos de carbono organizados em cadeias abertas, utilizando apenas ligações simples, podendo ser cadeias normais ou ramificadas. O alto grau de refino a que são submetidas fazem com que possuam cor branca e excelente estabilidade química (PETROBRAS, 2019).

O sulfato de amônio é utilizado como agente químico para acelerar a cura da resina, é composto, durante o processo de prensagem do painel. O Sulfato de Amônio apresenta-se na forma de grânulos ou cristais brancos e, contém 22% de nitrogênio e 24% de enxofre em sua composição. É um produto higroscópico e solúvel em água, álcool e benzina (PETROBRAS, 2019).

Outro elemento que faz parte do processo produtivo de painéis de madeira é o gás natural, combustível de origem fóssil. Utilizado quando necessário nos secadores e plantas térmicas, e normalmente para aquecimento do óleo térmico (PIEKARSKI, 2013). O gás natural é utilizado como combustível para fornecimento de calor, geração de eletricidade e de força motriz (PETROBRAS, 2019), extraído diretamente das jazidas de petróleo. Encontrado no estado físico gasoso na natureza, é constituído por hidrocarbonetos, dos quais o principal componente é o metano (CH_4), com composição química diferenciada de acordo com sua proveniência, podendo conter traços de etano, propano, butano, azoto, ácido sulfídrico, nitrogênio, ácido clorídrico, metanol e gás carbônico, e após receber tratamento adequado nas indústrias petroquímicas de beneficiamento, o gás natural possui aproximadamente de 81 a 97% de metano puro em sua composição (FGV ENERGIA, 2014).

Além do gás natural tem-se o uso do óleo diesel que pode ser usado em conjunto com as biomassas na planta térmica para a geração de energia, mas ainda todos os meios de transporte utilizam o óleo diesel. O Diesel é caracterizado como combustível derivado do petróleo, composto por hidrocarbonetos com cadeias de 8 a 16 carbonos, com inferior adição de nitrogênio, enxofre e oxigênio. Utilizado principalmente nos motores de combustão interna e ignição por compressão, em veículos rodoviários, ferroviários e marítimos e em geradores de energia elétrica (ANP, 2019). É um combustível inflamável, medianamente tóxico, volátil, límpido, isento de material em suspensão e com odor forte e característico (PETROBRAS, 2019).

3.4.2 Produção Industrial

A produção industrial dos painéis de madeira se inicia com o descascamento das toras e transformação em cavacos. Em seguida, os cavacos são fragmentados em partículas/fibras, as quais são selecionadas em uma peneira vibratória e seguem para a etapa de secagem, as quais permanecem em estufa até atingirem um teor de umidade de aproximadamente 3°C. Após, o processo de fabricação continua e então as partículas/fibras são destinadas a encolagem e formação do colchão. Posterior o colchão segue para a pré-prensagem, realizada a frio, a fim de reduzir a espessura do painel e retirada de ar. Seguindo para a etapa de prensagem a quente para a finalização do painel. Os painéis então são esquadrejados e cortados em dimensões comerciais e em seguida são lixados para obtenção da superfície lisa.

3.4.3 Distribuição

Após os painéis serem finalizados na indústria, os mesmos seguem para a distribuição aos clientes, geralmente utilizando o transporte rodoviário, sendo que este é o mais utilizado no país, pois é considerado mais barato em questões de transporte e manutenção no transporte, além de alcançar onde as malhas ferroviárias não conseguem. Para as exportações a distribuição realizada pelo transporte marítimo e transporte aéreo. O transporte aéreo quando comparado com o marítimo não é muito utilizado devido o custo ser mais elevado (SEBRAE, 2015).

3.4.4 Uso e Fim de Vida

De acordo com Piekarski *et al.* (2017) a dificuldade em analisar a etapa de uso e fim de vida dos painéis de madeira se dá pela dificuldade de rastreamento de dados, o que impossibilita a continuidade de um estudo, em consequência de seu longo ciclo de vida e ampla variedade de aplicações no móveis e arquitetura de interiores, e as diferentes destinações finais realizadas para os painéis.

Um dos principais problemas encontrado nos painéis de madeira é a resina à base de formaldeído, usada na aglutinação dos materiais, essa substância química

não reage totalmente, permanecendo no produto, e são emitidas no estágio de uso e fim de vida quando o descarte não ocorre de forma adequada, sendo que as emissões internas desses produtos químicos resultam prontamente na exposição humana (SILVA, 2008; SKAAR; JØRGENSEN, 2013; NAKANO *et al.*, 2018).

3.5 ECONOMIA CIRCULAR

A economia circular é um conceito que surgiu na década de 70 e ganhou forças nos anos 90. Segundo a Fundação Ellen MacArthur (2013) e a Norma BS 8001:2017 a economia circular é um modelo que objetiva manter componentes, materiais e produtos no máximo valor de utilidade em todos os momentos, distinguindo entre ciclos biológicos e técnicos, visando não só ganhos ambientais com a eliminação de resíduos, tal ganhos econômicos.

O conceito de economia circular surgiu de diversas escolas de pensamento e ganhou destaque nos anos 90, como a economia de serviços de Walter Stahel; a filosofia de design *Cradle to Cradle* (berço a berço) de William McDonough e Michael Braungart; a ideia de biomimética de Janine Benyus; a ecologia industrial de Reid Lifset e Thomas Graedel; o capitalismo natural de Amory e Hunter Lovins e Paul Hawken; e a abordagem *Blue Economy* descrita por Gunter Pauli (ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2018).

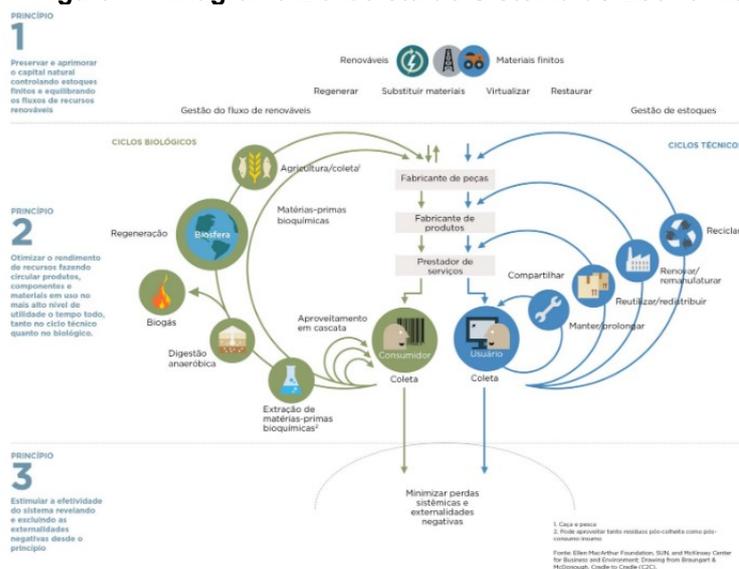
Ao contrário da economia vigente, conhecida como linear e que é baseada no princípio “pegar- fazer-descartar”, o foco da economia circular é não destruir recursos desnecessariamente (VAN BUREN *et al.*, 2016).

A economia circular é basicamente um sistema econômico que se fundamenta em modelos de negócios com o intuito de substituir o conceito de “fim de vida”, através de redução, reutilização alternativa, reciclagem e recuperação de materiais nos processos de produção/ distribuição e consumo, visando alcançar o desenvolvimento sustentável (KIRCHHERR *et al.*, 2017). A economia circular tem por intuito proporcionar a circularidade dos produtos, no entanto ela também inclui a circularidade dos serviços, quando o produto passa a ser visto como um serviço e o consumidor como usuário.

Segunda a Fundação Ellen Macathur (2017), o modelo de economia circular faz uma distinção entre ciclos técnicos e biológicos, como apresentado na Figura 11.

O ciclo biológico é marcado pelos alimentos e materiais de base biológica (algodão e madeira), projetados para retornar ao sistema pela compostagem e digestão anaeróbica. Já os ciclos técnicos são marcados pelas ações de: recuperar e restaurar produtos, componentes e materiais através de estratégias como reuso, reparo, remanufatura ou reciclagem.

Figura 11- Diagrama Borboleta do Sistema de Economia Circular



Fonte: Fundação Ellen MacArthur (2017)

De forma mais resumida, a economia circular pode ser definida como um sistema interconectado, intencionalmente projetado, onde os materiais fluem em um ciclo fechado, cujo desígnio é promover a sustentabilidade (FRANCO, 2017).

O conceito de economia circular vem ganhando destaque em meio empresarial (formuladores de políticas) e acadêmico. A principal proposta do conceito economia circular afasta-se das práticas “pegar-fazer-usar-descartar”, modificando-as para ciclagem e cascadeamento de materiais, peças e produtos, contribuindo assim, com a preservação de recursos, eficiência e produtividade (BLOMSMA, 2018). A economia circular está relacionada à reutilização de materiais componentes e produtos, sendo estes projetados para ter um longo ciclo de vida (ZACHO; MOSGAARD; RIISGAARD, 2018).

Um estudo realizado pela Ellen Mac Arthur Foundation, a Sun e a McKinsey constataram que adoção da economia circular na Europa pode reduzir em 50% os custos anuais com recursos primários, outros custos financeiros e externalidades negativas até 2030. Um exemplo é no Reino Unido, onde os custos com aterros

sanitários podem ser economizados em US\$ 1,1 bilhão por ano (ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2015).

Visando relacionar os bens que a economia circular tende a proporcionar, vê-se a oportunidade de relacionar com a indústria de painéis de madeira, setor este, que possui amplo campo para a inserção. A próxima seção discorrerá uma breve relação da economia circular e painéis de madeira.

3.6 ECONOMIA LINEAR versus ECONOMIA CIRCULAR

Segundo a Fundação Ellen Mac Arthur (2012), o modelo linear dominou a produção e o consumo de produtos nos últimos anos, com produção a base de matérias-primas virgens beneficiadas pelas indústrias, consumidos e descartados como resíduos após o uso.

O modelo linear segue atingindo significativo avanço na gestão de recursos, devido às novas tecnologias implantadas nas indústrias, no entanto, sabe-se que um sistema baseado apenas no consumo e descarte gera grandes perdas ao longo da produção, proporcionando impactos negativos, tais como volatilidade de preços das matérias-primas, degradação dos sistemas naturais devido à extração constante e perdas econômicas (ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2013).

Neste contexto, observou-se que o processo de fabricação de painéis de madeira pode ser incluído no que se caracteriza modelo “linear”, sendo visível o avanço tecnológico de maquinários, o desperdício de matéria-prima sem destino correto e a utilização de recursos naturais sem opção de substituição.

Sabe-se que a implementação da economia circular nas organizações denota a adoção de uma abordagem sistêmica à concepção de processos, produtos/ serviços e modelos de negócio para criar valor, permitindo a sustentabilidade e gestão de recursos (BS 8001:2017).

Com o intuito de relacionar o conceito de economia circular, adotando a abordagem sistemática, nas indústrias de painéis de madeira, buscam-se oportunidades a partir do ciclo de vida deste produto, por meio de uma análise minuciosa de cada etapa (extração, produção, uso e descarte) a fim de identificar as gerações de resíduos e desperdício em cada uma delas e, com isso propor circularidade para estes materiais e benefícios às indústrias.

Para que o processo de produção de painéis possa ser considerado circular devem-se levar em consideração os quatro pilares propostos pela Fundação Ellen MacArthur (2018), que visam estimular a transição e adoção do modelo econômico circular:

- 1- **Design de produtos e produção circulares:** As principais características do modelo de economia circular são ser regenerativa e restaurativa, tendo como objetivo a recuperação de componentes e materiais desde o design. Com isso, as empresas terão de desenvolver designs que possibilitem a reutilização, reciclagem e o aproveitamento do produto em cascata (uso repetido de um recurso normalmente em quantidade e qualidade decrescentes em cada estágio (BS 8001:2017)).
- 2- **Novos modelos de negócios:** Inserção de novos modelos que substitua e priorize o acesso em vez da propriedade, ou seja, a utilização do produto como se fosse um empréstimo, tendo total consciência que depois do uso ele deve retornar ao processo e ser reciclado ou reutilizado. Esses modelos orientam a transformação de consumidores em usuários.
- 3- **Ciclo reverso:** Para criar valor a partir de materiais e produtos usados, é necessário coletá-los e devolvê-los a sua origem. A logística reversa e os métodos de tratamento possibilitam o retorno desses materiais ao mercado.
- 4- **Condições Sistêmicas favoráveis:** a colaboração efetiva entre cadeias de valor e setores é essencial para o estabelecimento de um sistema circular de larga escala, tais como, parcerias no desenvolvimento de produtos, transparência e compartilhamento de informações, padrões setoriais.

Segundo a norma BS 8001:2017 a implementação da economia circular em organização visa um sistema econômico global que tende a prosperar em longo prazo, pois tem o potencial para originar economias muito mais resilientes, com recursos abundantes para o meio ambiente, tendo por intuito ajudar a combater as mudanças climáticas e seus impactos.

O modelo de economia circular traz um conjunto de novas ideias para a inovação, as organizações podem capturar novas fontes, por exemplo, oferecendo novos tipos de serviços (por exemplo, reparação, locação), capturando o valor de seus subprodutos (exemplo, é separado de outros fluxos) ou, para os negócios com saídas de material, alcançando novos mercados com produtos pré-usados ou

remanufaturados (por exemplo, mercados emergentes, provedores de seguros) (BS 8001:2017).

A transição da economia linear para circular nas indústrias, tais como as de painéis de madeira, só ocorrerá se for levada em consideração a metodologia de produção da economia circular: que visa à eliminação e geração de resíduos, adoção de recursos renováveis, utilização de pensamentos sistêmicos e a não externalização dos custos, bem como os quatro pilares citados. Esse novo modelo é uma alternativa válida e viável quando comparada com o modelo econômico atual, o linear (ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2018), pois permite a circularidade do processo. Se essa transição ocorrer às indústrias de painéis de madeira passará por transformações que permitirá ao produto ser denominado sustentável, pois a partir da implementação da economia circular em seu processo, a mesma apresentará uma produção mais limpa.

Para que uma organização, tais como, as indústrias de painéis de madeira possam colocar em prática o modelo de economia circular devem considerar três principais abordagens citadas pela norma BS 8001:2017, sendo estas:

- a) Analisar os primeiros fluxos de materiais que são vistos como resíduos (seja na produção ou no pós-consumo), pois estes podem se tornar entradas valiosas em outros processos. Devem aproveitar ao máximo esses fluxos, o que pode exigir alguns ajustes nos processos e projetos de produção (por exemplo, reduzindo o número de ou tipos de materiais usados para criar economias de escala). Para o fluxo de material considerado desperdício (irrecuperável e sem valor ou até mesmo prejudicial), todos os esforços possíveis devem ser feitos para reduzi-los ou eliminá-los.
- b) O valor capturado dos recursos pode ser aumentado usando produtos mais longos ou ciclos de uso múltiplos. Isso geralmente exige esforços colaborativos em cadeias de valor para permitir alterações no design dos produtos (por exemplo, utilizando materiais mais duráveis ou compostáveis, para poderem ser atualizados ou reparáveis), nesses casos o desenvolvimento de logística reversa é o melhor tratamento para esses processos (por exemplo, centros de reparação, instalações de digestão anaeróbica). Adoção de modelos de negócios como leasing, pode permitir aos produtores e clientes capturar uma parte do valor criado e reduzir os custos iniciais para o usuário.
- c) Finalmente, capacidade ociosa, seja no espaço ou no equipamento, também pode ser alavancada como um novo valor corrente. Isso pode ser feito dentro de uma

organização ou em diferentes organizações e indivíduos através de esquemas de partilha.

Além das três abordagens a se considerar, destaca-se o modelo de negócio PSS, que é o Sistema de serviço de produto (*PSS-Product Service System*) ou servitização. O PSS é considerado um modelo de negócios que integra produtos e serviços com o objetivo de atender às necessidades do cliente (TUKKER, 2004; SPRING; ARAUJO, 2017).

3.7 INDICADOR DE ECONOMIA CIRCULAR

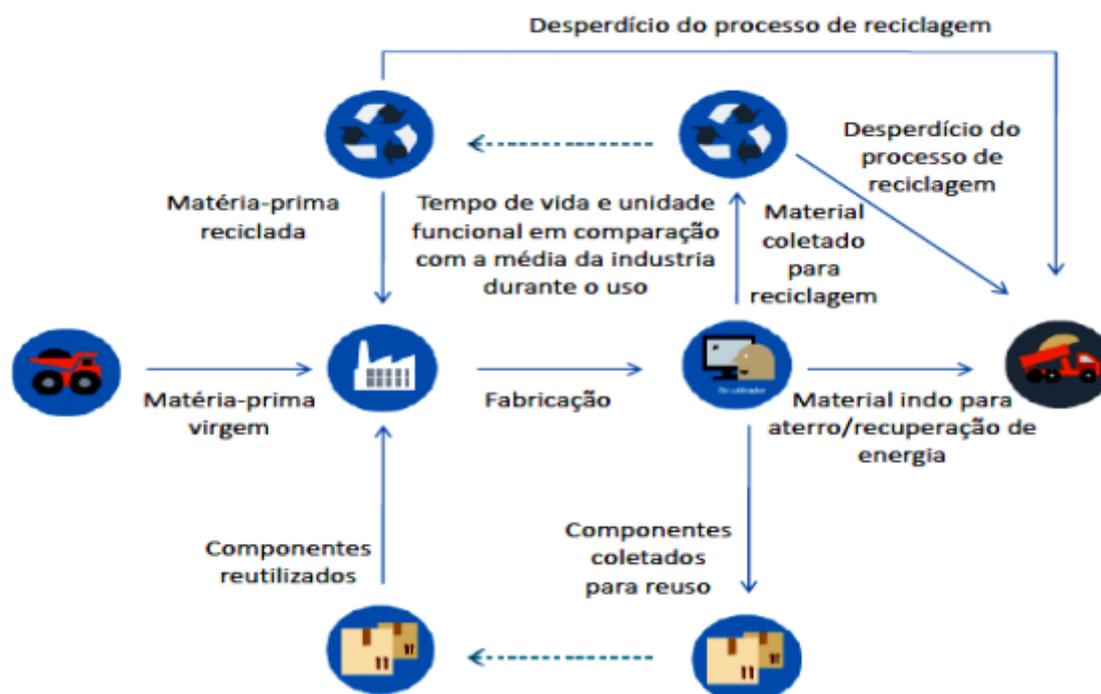
O indicador de circularidade tem por objetivo medir a circularidade de produtos, especificamente a restauração de fluxos de materiais (ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2015) e, podem ser classificados em nível macro (cidade, país), meso (parques industriais) e micro (produto, organização e consumidores individuais) (LINDER; SARASIN; LOON, 2017).

Na literatura, os indicadores de circularidade, podem ser quantificados a partir de diferentes parâmetros (valor econômico, massa, energia) em função de diferentes variáveis (fluxos, ações, mudanças de estoque) ou proporções (LINDER; SARASINI; LOON, 2017).

Destaca-se como indicador de circularidade o *Material Circularity Indicator* (MCI), desenvolvido pela Fundação Ellen MacArthur. O MCI pode ser aplicado em dois níveis: nível de produto (mensura o quão circular é o produto), e, nível corporativo (compara produtos dentro de um portfólio) (ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2015). O MCI tem como finalidade: utilizar recursos reciclados ou reutilizados, reutilizar ou reciclar componentes na fase de fim de vida, manter produtos em uso por mais tempo, fazer o uso mais intenso de materiais e produtos.

O MCI é essencialmente construído a partir de uma combinação de três características do produto: massa (V) de matéria-prima virgem utilizada no fabrico, a massa de resíduos irrecuperáveis que é atribuído ao produto (W), e um fator de utilidade (X) que representa a duração e a intensidade do uso do produto. A Figura 12, apresenta o fluxo de material considerado para o cálculo do indicador de circularidade MCI.

Figura 12- Itens considerados para o cálculo do MCI



Fonte: Ellen Macarthur Foundation (2017)

Assim, pelo MCI um determinado produto fabricado apenas com matéria-prima virgem e destinado ao aterro no final da sua fase de utilização pode ser considerado um produto totalmente "linear". Por outro lado, qualquer produto que não contém matéria-prima virgem e, é completamente coletado para reciclagem ou reutilização de componentes, e a eficiência de reciclagem é de 100% pode ser considerado um produto totalmente "circular". Em prática, a maioria dos produtos fica em algum lugar entre esses dois extremos e o MCI mede o nível de circularidade no intervalo de 0 a 1.

3.7.1 MCI

O Indicador de Circularidade de Material é construído pela computação de entrada de matéria-prima virgem e resíduos irrecuperáveis, sendo o último passo o cálculo do fator utilitário. As equações apresentadas a seguir são de Ellen MacArthur Foundation (2015).

3.7.1.1 Material virgem

A quantidade de material virgem utilizado para na produção de um produto é determinada pela Equação 1:

$$V = M * (1 - F_r - F_u) \quad (1)$$

Onde:

V : Massa de matéria-prima virgem usada em um produto;

M : Massa do produto acabado;

F : Fração de matéria-prima proveniente de fontes recicladas;

F_u : Fração de matéria-prima proveniente de fontes reutilizadas.

3.7.1.2 Resíduos irrecuperáveis

Se C_r representa a fração da massa do produto que é coletado para reciclagem no fim de sua fase de uso e C_u a fração da massa do produto indo para reutilização, a quantidade de resíduos destinados a aterros ou a recuperação de energia é representada pela Equação 2:

$$W_0 = M * (1 - C_r - C_u) \quad (2)$$

Onde:

W_0 : Massa de resíduos irrecuperáveis de um produto que vai para aterro;

M : Massa do produto;

C_r : Fração de massa do produto coletado para o processo de reciclagem;

C_u : Fração de massa de um produto em reutilização de componentes.

3.7.1.3 Resíduos gerados no processo de reciclagem

Se E_c é a eficiência do processo de reciclagem utilizado para a reciclagem do produto no final da fase de uso, a quantidade de resíduos gerados no processo de reciclagem é dada pela Equação 3:

$$W_c = M * (1 - E_c) * C_r \quad (3)$$

Onde:

W_c : Massa de resíduos irre recuperáveis do processo de reciclagem;

M: Massa do produto;

E_c : Eficiência do processo de reciclagem;

C_r : Fração de massa do produto coletado para o processo de reciclagem.

Também haverá resíduos gerados para produzir qualquer conteúdo reciclado usado como matéria-prima. Isso é dado pela Equação 4.

$$W_F = M * \frac{(1-E_f)*F_r}{E_f} \quad (4)$$

Onde:

W_F : Massa de resíduos irre recuperáveis gerada ao produzir matéria-prima reciclada;

E_f : Eficiência do processo de reciclagem para produzir a matéria-prima reciclada;

M: Massa do produto;

F_r : Fração de matéria-prima proveniente de fontes recicladas.

3.7.1.4 Rejeitos totais e irre recuperáveis.

A quantidade de rejeito total irre recuperável de um produto é representada pela Equação 5:

$$W = W_0 + \left(\frac{W_F+W_c}{2}\right) \quad (5)$$

Onde:

W : Rejeito total e irre recuperável;

W_0 : Massa de resíduos irre recuperáveis de um produto que vai para aterro;

W_c : Massa de resíduos irre recuperáveis do processo de reciclagem;

W_F : Massa de resíduos irrecuperáveis gerada ao produzir matéria-prima reciclada;

3.7.1.5 Índice de Fluxo Linear

O Índice de Fluxo Linear (LFI) mede a proporção de material fluindo de forma linear, isto é, advindo de materiais virgens e acabando com desperdício irrecuperável. Então o LFI é calculado dividindo a quantidade de material que flui de forma linear pela soma das quantidades de material fluindo de uma forma linear e restauradora (ou fluxo de massa total, para breve).

O índice recebe um valor entre 1 e 0, em que 1 é um fluxo completamente linear e 0 a fluxo completamente restaurativo, representado pela Equação 5.

$$LFI = \frac{V+W}{2 * M + \frac{Wf - Wc}{2}} \quad (6)$$

Onde:

V : Massa de matéria-prima virgem usada em um produto;

W : Massa total de resíduos irrecuperáveis associadas ao produto;

W_F : Massa de resíduos irrecuperáveis gerada ao produzir matéria-prima reciclada;

W_c : Massa de resíduos irrecuperáveis do processo de reciclagem;

3.7.1.6 Fator utilitário

O utilitário X é o cálculo da duração e intensidade que um produto é utilizado em comparação com produtos similares. Tendo dois componentes: um responsável pela duração da fase de uso do produto (tempo de vida) e outro para a intensidade de uso (unidades funcionais). Sendo apresentado na Equação 6.

$$X = \left(\frac{L}{L_{av}} \right) * \left(\frac{U}{U_{av}} \right) \quad (7)$$

Onde:

X : Utilidade de um produto;

L : Tempo de vida médio de um produto;

U : Número médio de unidades funcionais durante o uso de um produto;

L_{av} : Tempo de vida médio de produtos similares;

U_{av} : Número médio de unidades funcionais durante o uso de produtos similares.

3.7.1.7 Indicador de Circularidade de Material

O Indicador de Circularidade Material de um produto é definido considerando o Índice de Fluxo do produto e um fator $F(X)$, construído como uma função F da utilidade X que determina a influência da utilidade do produto em seu MCI. A equação 7 é usada para calcular MCI do produto:

Então F é:

$$F(X) = \frac{0,9}{X} \quad (8)$$

$$MCI = 1 - LFI * F(X) \quad (9)$$

Onde:

MCI: Indicador de Circularidade Material de um produto,

LFI: Índice de Fluxo Linear.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo estão apresentados todos os dados e resultados obtidos pós-investigação em estudos de casos dispostos na literatura, estudos de ACV, levantamento de *hotspots* por fase do ciclo de vida dos painéis de madeira, além de buscas em relatórios de sustentabilidade e vídeos institucionais, a fim de identificar e propor melhorias no sistema produtivo, visando alcance da circularidade.

4.1 SISTEMA PRODUTIVO DE PAINÉIS DE MADEIRA

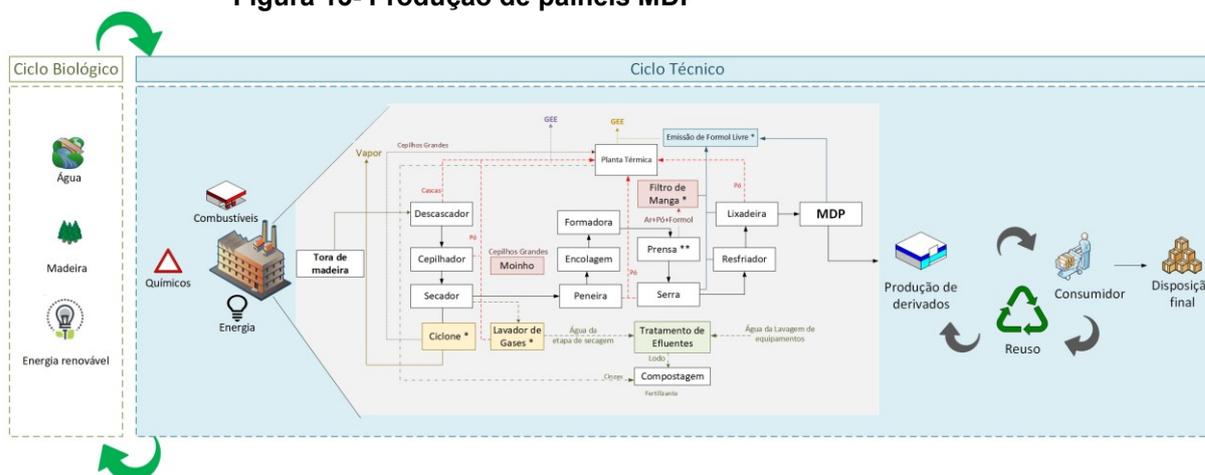
Em busca de mapear os sistemas produtivos de painéis de madeira reconstituída, no contexto brasileiro, analisaram-se estudos de casos, relatórios de sustentabilidade e vídeos institucionais que estavam disponíveis nos meios de comunicação. Com essa análise foi possível montar o diagrama de produção com entradas e saídas do processo, na perspectiva *gate-to-gate*. Esses diagramas foram separados por ciclo técnico e biológico, usando como referência para tal, o diagrama borboleta disponibilizado pela fundação Ellen MacArthur. As etapas marcadas com (*) são denominadas “*end of pipe*” (fim de tubo), não fazendo parte de princípios de economia circular, pois são tecnologias que ajudam a filtrar os poluentes, porém não são tecnologias para reduzir a emissão. Já a etapa representada com (**) mostra que existe a emissão de formaldeído livre.

Nos três diagramas apresentados nesta seção, nas etapas referenciadas como ciclo biológico se encontram os elementos que podem ser descartados (diretamente ou que passam por vários usos) na natureza, a fim de enriquecer a biosfera ao invés de contaminá-la. Este ciclo é marcado pela água, energia, madeira e, o fertilizante “verde” que retorna a biosfera como forma de contribuir ao solo, reduzindo assim, o uso de fertilizantes industriais que são agressivos ao meio ambiente. Já nos ciclos denominados técnicos, está projetada a etapa de manufatura do produto, bem como a disposição para elaboração de derivados, tendo em vista a reutilização dos mesmos após disposição final, visando o aumento da vida útil do produto, antes de encaminhá-los ao aterro.

4.1.1 Sistema de Produção do MDP

Dentro do exposto, a Figura 8 trás a compilação das etapas do sistema produtivo de painéis de MDP pertencentes às empresas do território brasileiro, marcada pela separação em ciclo biológico e técnico.

Figura 13- Produção de painéis MDP



Fonte: Autoria própria

O processo produtivo de painéis MDP se inicia com a chegada da matéria-prima no pátio industrial. A tora de madeira, o elemento essencial à produção, ao chegar à fábrica são classificadas por teor de umidade e, armazenadas até entrarem no processo seguinte. As toras são então, descascadas, pois devido ao alto teor de sílica, as cascas apresentam efeitos prejudiciais à qualidade final do painel, sendo estas direcionadas a caldeira da usina térmica e, as toras ao cepilhador. No cepilhador ocorre à transformação das toras em pequenos pedaços denominados cepilhos. Ainda, nesta etapa, há à geração de pó (finos), o qual é recolhido e, encaminhado à queima na caldeira da usina térmica junto às cascas.

Depois de transformadas em cepilhos, a madeira é conduzida para um silo e encaminhada para secadores. A madeira passa por secadores através do movimento rotativo com a presença uniforme de calor. O calor utilizado neste processo é proveniente da usina térmica, produzido pela queima da biomassa. A umidade do cepilho é reduzida para aproximadamente 2%. Após a secagem, o vapor é então alocado em um ciclone, a fim de retirar os cepilhos mais grossos. Os cepilhos mais finos são retirados com o auxílio de um lavador de gases. Ambos os cepilhos seguem para a queima na caldeira e, o material já seco para a peneira classificatória.

No classificador há uma separação entre as partículas finas e grossas, essa separação colabora na maior resistência e estabilidade do painel evitando o empenamento do produto, tornando sua superfície mais uniforme. Os cepilhos grandes não selecionados seguem para os moinhos onde são refinados e reutilizados no processo e, o pó presente no fundo da peneira é enviado à caldeira.

A madeira é impregnada com resina, parafina e catalisador (sulfato de amônio) em processos automatizados. A resina utilizada no processo é composta por ureia e formol. As partículas são selecionadas e, separadas em três camadas, os cepilhos grossos ficam na camada interna e, os finos na externa, essa disposição proporciona mais disponibilidade ao painel e evita seu empenamento. A madeira chega então à formadora, um equipamento que tem por função distribuir as camadas interna e, externa, formando uma espécie de colchão e, é neste ponto do processo que os painéis adquirem uma superfície exclusiva mais lisa e uniforme, assegurando um excelente acabamento para aplicação de pressão, pintura e, outros revestimentos.

A prensagem é considerada uma das etapas mais importantes do processo já que neste momento são definidas as propriedades físico-mecânicas dos painéis, na prensa com ação de pressão e, temperatura próxima a 200°C é transformada em painel de madeira aglomerada, sua espessura excedente é retirada na lixadeira após a climatização. Esta etapa apresenta a liberação de ar acompanhado de pó e, formaldeído, passando por um filtro de manga, o qual realiza a exaustão do ar, separando o pó gerado do ar, sendo encaminhado para a usina térmica e, o ar com formaldeído liberado na atmosfera.

No resfriador o painel fica em climatização perdendo o calor obtido na prensagem até a sua estabilização. Em seguida, é feito o corte em seccionadora, após este corte, ele passa então por 48 horas de climatização. Finalmente, o painel vai para a lixadeira, ficando liso e, calibrado (na mesma espessura em toda a sua extensão), após isto ele está preparado para ser embalado e, transportado para os mercados consumidores.

A usina de energia térmica é responsável pela queima da biomassa para geração de calor de óleo térmico (usado na prensa), vapor e, ar quente responsável por abastecer os equipamentos da indústria, tais como, o secador e, a prensa.

A etapa de tratamento de efluentes é responsável pela captação dos resíduos líquidos oriundos dos processos de lavagem dos equipamentos e, dos lavadores de gases existentes na etapa de secagem, para tratamento e, retorno do efluente ao

processo, por diversas vezes, a fim de reduzir o consumo de matéria orgânica, com isso também, a empresa investe em captação de água da chuva.

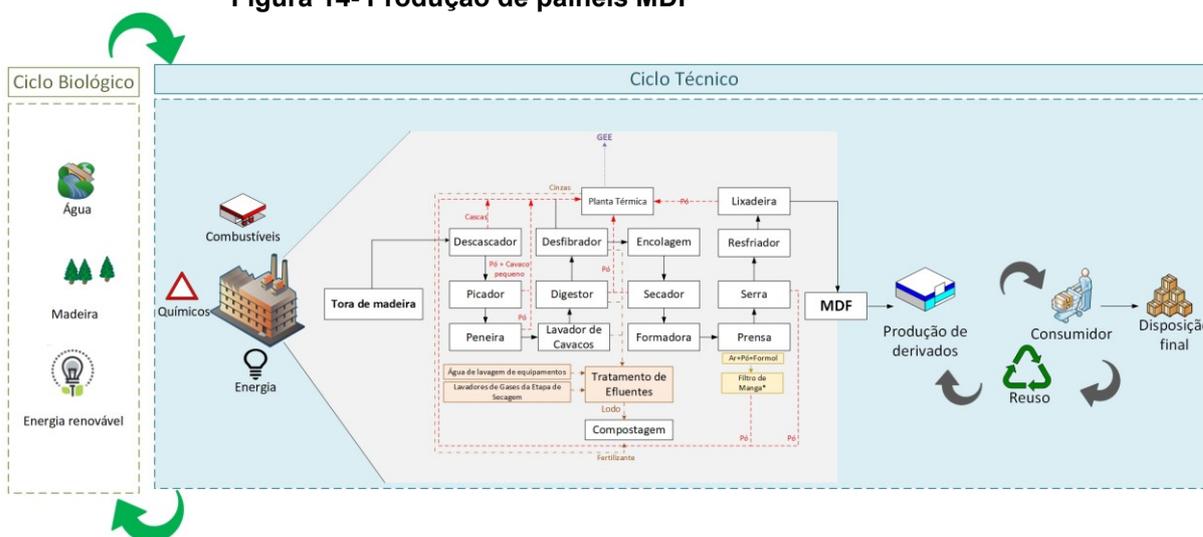
Os resíduos dispostos na caldeira da usina térmica após a queima da biomassa e o lodo gerado na estação de tratamento de efluentes são enviados a uma usina de compostagem. Os quais são transformados em compostos orgânicos, para uso no solo das áreas florestais, como fertilizantes, reduzindo assim, o envio de resíduos ao aterro.

Com as informações obtidas da produção de painéis de madeira é possível identificar que este processo não pode ser considerado sustentável apenas por possuir como elemento principal a madeira proveniente de reflorestamento, sendo que os demais produtos utilizados são provenientes de fontes não renováveis, e o material ligante utilizado, a resina ureia-formaldeído possui em sua composição, o formol, um componente tóxico a saúde humana e ao meio ambiente. Além de liberar ao meio ambiente emissões de gases de efeito estufa. Caracterizando, um processo que necessita de investigações e soluções de melhorias ambientais ao produto.

4.1.2 Sistema de Produção do MDF

Além das investigações realizadas no sistema produtivo de MDP, buscou-se analisar também o MDF, o painel de madeira que vem sendo muito utilizado ultimamente principalmente pelas indústrias moveleiras do Brasil, devido às particularidades que o caracterizam. A Figura 9 expõe os processos que envolvem a produção de MDF, com entradas e saídas de elementos de cada etapa.

Figura 14- Produção de painéis MDF



Fonte: Autoria própria

Após a colheita, as toras seguem à indústria e, ficam armazenadas em pátios. O processo de produção se inicia com as toras sendo descascadas em um equipamento denominado tambor descascador. As toras descascadas seguem para o processo de fragmentação da tora em cavacos, em um picador e, as cascas para a usina de energia térmica, para serem empregadas como biomassa na queima.

No picador são gerados cavacos de diversos tamanhos, mas nem todos os cavacos são utilizados na produção do painel, se fazendo necessária a classificação em uma peneira vibratória, a fim de selecionar apenas os cavacos considerados ideais (com dimensão entre 5 a 36 mm). Os cavacos não selecionados são enviados juntamente com as cascas para a queima em caldeira para a geração de calor, com o intuito de alimentar a usina de energia. O calor gerado é utilizado em diversos processos de produção da empresa (desfibrador, secador e prensa), além do calor, a usina térmica também gera óleo térmico.

Os cavacos selecionados são destinados ao extrator de metais, a fim de retirar os materiais presentes na madeira que não fazem parte do processo. Em seguida os cavacos seguem para o lavador de cavacos que utiliza água superficial, depois disto são transportados para um silo de pré-cozimento, tendo como saídas, fibras de madeira que seguem para a etapa de encolagem e, efluentes líquidos, que são destinados à estação de tratamento de efluentes.

As fibras de madeira recebem a inserção de emulsão parafínica e resina ureia-formaldeído. Em seguida as fibras são secas a uma temperatura de até 180°C para obtenção da umidade adequada, avançando para o processo de formação do colchão.

A formação do colchão de fibras se inicia no *fiberbin* que é um equipamento que faz a dosagem constante de fibras no processo, seguido da formadora, a qual deposita as fibras sobre uma cinta de transporte. O colchão segue em frente e, passa por uma equalizadora com a finalidade de aplainar a superfície do painel e, logo segue para a pré-prensa que tem a função de retirar o excesso de ar do colchão de fibra.

Antes de seguir para a prensa, o colchão é submetido a equipamentos de controle de qualidade, tais como, o raio-X que faz a varredura por toda a direção transversal do colchão garantindo que ele possua a mesma densidade em toda essa direção e, o spray que faz a aplicação de micro gotas de água sobre a superfície do painel, proporcionado ao produto final uma superfície mais compacta.

Após o controle de qualidade, o colchão passa pela prensa fazendo com que o painel de MDF seja realmente concebido sob a ação de calor e pressão, todos os componentes são unidos. As chapas saem da prensa com temperatura de aproximadamente 150°C e precisam ser resfriadas antes de serem empilhadas para a climatização. Depois do resfriamento as chapas são climatizadas por 36 horas e em seguida seguem para o lixamento e corte. Os painéis podem ser revestidos ou sem acabamento.

Os resíduos industriais da estação de tratamento e, da caldeira (lodo, cinzas e resíduos orgânicos) são destinados ao processo de recuperação de compostagem.

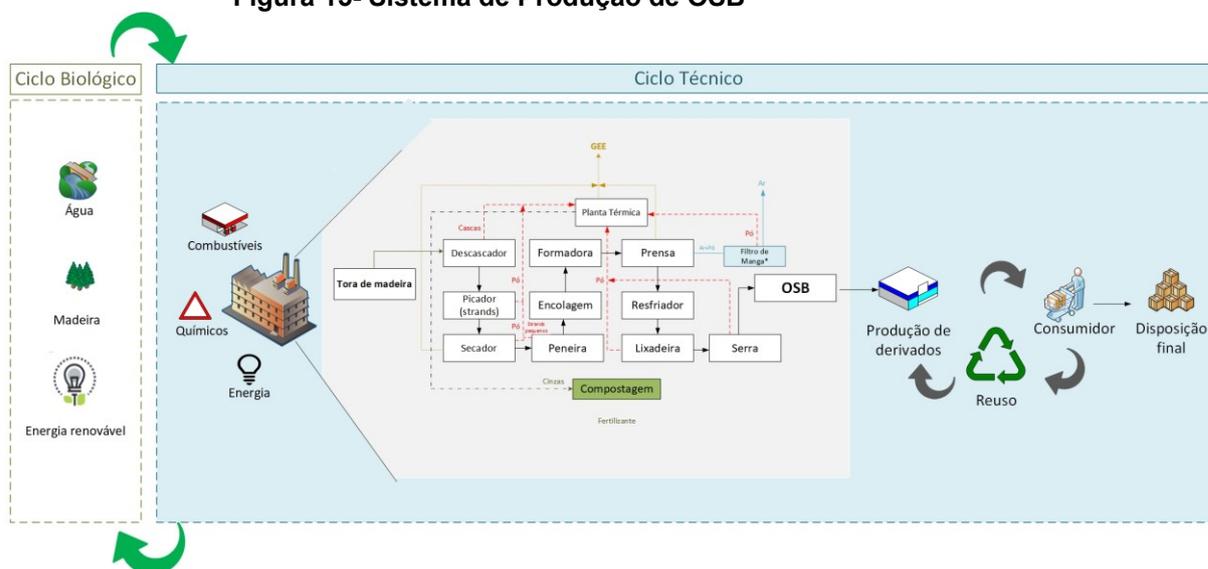
Assim como na produção de MDP, a madeira utilizada é 100% proveniente de reflorestamento, no entanto, alguns componentes utilizados não se caracterizam como elementos ecologicamente corretos, devido às fontes de obtenção e suas composições. Sendo também, a produção de MDF dependente de investigações aprofundas de dados da produção, para que novos caminhos inovadores possam ser recomendados e, a curto-médio-longo prazo implementado.

4.1.3 Sistema de Produção de OSB

Outro painel analisado é o OSB, pois mesmo que ainda possua baixa produção no Brasil, tende apresentar elevado crescimento nos próximos anos, tanto a nível nacional quanto para exportações, devido às aplicações estruturais que os caracterizam. Na América do Norte e o uso de painéis de OSB já está bem difundido, pois são empregados em sistemas produtivos de Wood Frame e Steel Frame (APA,

2011), por apresentarem composição em camadas defasadas de 90°, onde se consegue um ganho de resistência mecânica nas duas principais direções. O sistema de produção do painel OSB está apresentado na Figura 10.

Figura 15- Sistema de Produção de OSB



Fonte: Autoria própria

Assim como nos sistemas produtivos de MDP e MDF a produção de painel OSB se inicia com a chegada da madeira, transportada por caminhões, no interior do espaço fabril. As toras então são alocadas e armazenadas no pátio e, em seguida são descascadas. As cascas seguem então para a usina térmica onde atuam como biomassa na geração de calor e, as toras descascadas seguem ao picador.

Nos picadores as toras são transformadas em “strands” e, secas através do contato com gás quente, até que o teor de umidade se equipare a no máximo 6%. O gás quente usado na secagem dos strands é proveniente da combustão da casca e outros materiais lenhosos obtidos no decorrer do processo de produção do painel, encaminhados à usina de energia térmica.

Os strands já secos seguem para o processo de triagem, o qual é separado os strands dos materiais mais finos e, pequenos que são considerados inadequados para a formação da manta de OSB. As partículas finas retiradas do processo são encaminhadas para a unidade de geração de calor. Este calor é gerado para utilização na etapa de secagem e, aquecimento do óleo térmico da prensa a quente e, os strands considerados em conformidade seguem para a etapa de encolagem.

O processo de encolagem se inicia com a chegada dos “strands” no equipamento denominado encoladeira, é neste processo que a mistura de resina

líquida, parafina e piretróides são pulverizadas nas partículas. A inserção de parafina e termicida piretróide garante ao produto final melhor higroscopicidade e resistência ao ataque de agentes xilófagos.

Após a etapa de encolagem, as partículas são encaminhadas para a formação do colchão de OSB, onde são preparadas em três camadas. Sendo a camada interna defasada em 90° das camadas externas.

Com a formação do colchão de partículas pronto, o mesmo é enviado para a consolidação na prensa a quente, por ação de pressão e, temperatura durante um período específico de tempo, até que ocorra a cura da resina. O painel consolidado é, então, resfriado e encaminhado para a lixadeira, onde é realizada a padronização da espessura e retirada às imperfeições presentes na superfície do painel.

Posteriormente ao processo de lixamento, os painéis já padronizados são encaminhados à etapa de corte, onde a uniformização da largura e comprimento do painel é realizada conforme requisitos do cliente. Os resíduos gerados durante o corte são encaminhados para a geração de calor. E, finalmente, o resíduo da unidade de geração de calor, (cinzas e resíduos orgânicos) são enviados para compostagem.

Observando os detalhes deste sistema de produção, do mesmo modo que a produção de painéis MDP e MDF apresentam pontos que precisam de mudanças, o sistema produtivo de OSB também necessita. Para que este painel e os demais já citados possam pertencer à categoria de produtos que adotam princípios de circularidade, os principais identificados como barreiras são o uso de materiais não renováveis que contribuem para com a escassez de recursos e emissões de gases de efeito estufa, além do uso de produtos com elementos tóxicos. Com isso, uma análise mais detalhada desse sistema foi realizada para concluir de fato quais são os principais contribuintes que dificultam transição do modelo linear ao circular. Sendo esta embasada nos estudos de ACV em painéis de madeira (MDP, MDF e OSB) dispostos na literatura.

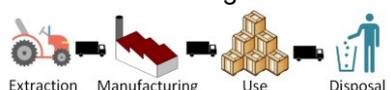
4.2 PRINCIPAIS *HOTSPOTS* DO CICLO DE VIDA DE PAINÉIS DE MADEIRA

Com a necessidade de se aprofundar em dados do sistema produtivo de painéis de madeira buscando a promoção da economia circular neste setor, pesquisou-se na literatura estudos que tratam da avaliação do ciclo de vida dos

painéis de madeira e, trazem os principais geradores de impactos ambientais. Para isso é necessária a análise conjunta da economia circular com a ACV, pois aumentar a circularidade sem analisar os impactos ambientais não é viável, pelo fato de que o aumento da circularidade pode ocasionar mais impacto ambiental.

A busca não se delimitou apenas a estudos nacionais, pelo fato de identificar, se os estudos internacionais também apresentam os mesmos *hotspots* dos estudos nacionais, mesmo com um sistema de produção e tecnologias mais avançadas. Neste contexto, o Quadro 6 expõe os estudos encontrados no decorrer das buscas, com a perspectiva do ciclo de vida adotada pelos autores.

Quadro 6- Fronteiras do sistema adotadas pelos estudos

Fronteira do sistema	Estudos
<p>Cradle-to-gate</p>  <p>Extraction Manufacturing</p>	<p>Silva <i>et al.</i> (2013) / Piekarski <i>et al.</i> (2017) / Ferro <i>et al.</i> (2018) / Iritani <i>et al.</i> (2015) / Gonzalez-Garcia <i>et al.</i> (2019) / Nakano <i>et al.</i> (2018)) /Bergman <i>et al.</i>(2015)</p>
<p>Gate-to-gate</p>  <p>Manufacturing</p>	<p>Kouchaki-Penchah <i>et al.</i> (2016) / Kouchaki-Penchah <i>et al.</i> (2016)/ Rivela, (2007)</p>
<p>Cradle-to-grave</p>  <p>Extraction Manufacturing Use Disposal</p>	<p>Nakano <i>et al.</i> (2018)</p>

Fonte: Autoria própria

Como visto no Quadro 6, uma quantidade maior de estudos está relacionada a perspectiva do ciclo de vida *cradle-to-gate*, justificado pela dificuldade de rastreamento do uso e fim de vida do painel. A partir dos estudos acima listados, foi realizada uma exploração detalhada de cada aplicação de ACV, em cada fronteira do sistema adotada pelos pesquisadores, buscando conhecer quais etapas do ciclo de vida dos painéis de madeira apresentam maiores impactos ambientais nas categorias adotadas em cada trabalho e, quais os principais contribuintes para tais impactos. Com essa constatação, viu-se a relação dos mesmos com a dificuldade de transição do modelo linear ao circular.

4.2.1 *Cradle-to-gate*

A perspectiva *cradle-to-gate* tem por finalidade a averiguação das etapas de obtenção de matéria-prima, bem como, a etapa de manufatura do produto dentro da indústria. Isto posto, os estudos descritos no Quadro 7 discorrem sobre os potenciais impactos ambientais relacionados à obtenção de toda matéria-prima utilizada para a confecção do painel, assim como os impactos gerados durante a confecção. Os resultados apresentados estão dispostos por estudos, tais como, os principais *hotspots* encontrados em cada categoria de impacto e, em seguida uma breve contextualização sobre cada um é abordado. O intuito desta etapa, foi identificar os principais *hotspots* ambientais no ciclo de vida do painel na fronteira do sistema berço ao portão de fábrica e, com este levantamento propor melhorias ambientais que se caracterizem fomento da economia circular neste setor, além de mostrar que a economia circular e ACV caminham juntas rumo a uma produção mais limpa.

Quadro 7- Perspectiva Cradle-to-Gate

Estudo	Tipo de Painel	Etapas do ciclo de vida									Porcentagem de impacto por fase do ciclo de vida	Principais Hotspots
		Categorias AICV	Obtenção de matéria-prima	Manufatura	Total	Unidade	% Obtenção de matéria-prima	% Manufatura	Uso	Fim de vida		
Silva et al. (2013)	MDP	AD	1,70E-01	8,10E-01	9,80E-01	kg Sb Eq.	17%	83%	N/A	N/A		Óleo combustível pesado / resina UF
		AC	3,40E-01	2,06E+00	2,40E+00	kg SO 2Eq.	14%	86%	N/A	N/A		Óleo combustível pesado / resina UF
		EP	5,20E-02	8,00E-02	1,32E-01	kg PO -3 4Eq.	39%	61%	N/A	N/A		Diesel/ fertilizantes / resina UF
		GW	2,67E+01	3,07E+02	3,33E+02	kg de CO2 Eq.	8%	92%	N/A	N/A		Eletricidade /óleo combustível pesado / resina UF
		PO	2,00E-02	2,60E-01	2,80E-01	kg C 2 H 2 Eq.	17%	93%	N/A	N/A		Resina UF
		EC	8,19E+01	9,00E-01	8,28E+01	PAF m 3 dia	99%	1%	N/A	N/A		Herbicida de glifosato
		HT	2,10E-08	6,50E-07	6,71E-07	Casos	3%	97%	N/A	N/A		Resina UF
Iritani et al. (2015)	Móvel de MDP	GW	1,54E+02	1,37E+02	2,91E+02	kg de CO 2 - Eq.	53%	47%	N/A	N/A		Obtenção de matéria-prima(Impacto do MDP/Eletricidade/Resina)
		OD	2,60E-06	1,70E-06	4,30E-06	kg R 11 - Eq.	62%	38%	N/A	N/A		Obtenção de matéria-prima(Energia elétrica)
		PO	1,53E-01	2,70E-02	1,80E-01	kg C 2 H 4-Eq.	85%	15%	N/A	N/A		Fornecimentos de insumos, decorrentes do ciclo de vida do MDP (emissões de formaldeído)
		AC	9,10E-01	5,80E-01	1,49E+00	kg SO2 - Eq.	61%	39%	N/A	N/A		Fornecimentos de insumos, decorrentes do ciclo de vida do MDP (consumo de diesel, óleo pesado(caldeira))
		CES	1,10E+01	0,00E+00	1,10E+01	m³ -Eq.	100%	0%	N/A	N/A		Emissões de formaldeído livre durante a produção de MDP
		AEW	2,80E+02	1,65E+02	4,45E+02	m³ -Eq.	63%	37%	N/A	N/A		Uso de resina UF durante o processo de fabricação do MDP
		CEW	3,30E+03	1,62E+03	4,92E+03	m³ -Eq.	67%	33%	N/A	N/A		Emissões livres de formaldeído durante o uso da resina UF na produção de MDP
		HTA	7,01E+08	7,08E+06	7,08E+08	m³ -Eq.	99%	1%	N/A	N/A		Emissões livres de formaldeído durante o uso da resina UF na produção de MDP
		HTW	2,54E+02	5,20E+01	3,06E+02	m³ -Eq.	83%	17%	N/A	N/A		Emissões de metais pesados durante a produção do aço utilizado na fabricação dos componentes de conexão utilizados no guarda-roupa.
		HTS	2,99E+00	9,99E+00	1,30E+01	m³ -Eq.	23%	77%	N/A	N/A		Emissões livres de formaldeído durante o uso da resina UF na produção de MDP
Piekarski et al. (2017)	MDF	AC	5,80E-01	1,01E+00	1,59E+00	kg SO2 - Eq.	36%	64%	N/A	N/A		Gás Natural/Resíduos de madeira
		GW	1,58E+02	4,06E+01	1,99E+02	kg CO2- Eq.	80%	20%	N/A	N/A		Gásnatural/Energia elétrica/Resina UF/Transporte
		ET	2,91E+01	3,22E+00	3,23E+01	CTU	90%	10%	N/A	N/A		Energia elétrica/Resina UF/Transporte/Cavacos de Madeira
		PFTO	2,10E-02	2,16E-01	2,37E-01	kg de Etileno	9%	91%	N/A	N/A		Gás Natural/Resíduos de madeira
		HT	5,03E-06	1,63E-06	6,66E-06	CTU	75%	25%	N/A	N/A		Energia elétrica/Resina UF/Transporte/Cavacos de Madeira
		AD	1,51E+00	0,00E+00	1,51E+00	kg Sb Eq.	100%	0%	N/A	N/A		Gás natural/Energia elétrica/Resina UF/Transporte
		OD	2,37E-01	0,00E+00	2,37E-01	kg CFC Eq.	100%	0%	N/A	N/A		Gás natural/Energia elétrica/Resina UF/Transporte
		EU	1,23E-01	1,64E-01	2,87E-01	MI kg PO4- Eq	43%	57%	N/A	N/A		Gás Natural/Resíduos de madeira

Ferro et al. (2018)	OSB	CC	12	115	127	kg de CO 2 Eq.		9%		91%	N/A	N/A		Resina/Óleo Bruto/Produção de eletricidade
		OD	1,90E-06	6,40E-06	0,0000083	kg CFC-11 Eq.		23%		77%	N/A	N/A		Produção de químicos/Madeira redonda(Diesel)/ Produção de Resina MDI
		TA	0,09	0,92	1,01	kg SO 2 Eq.		9%		91%	N/A	N/A		Biomassa residual/Produção de Resina MDI
		FE	4,10E-03	5,90E-03	0,01	kg P Eq.		41%		59%	N/A	N/A		Produção de químicos/Fertilizantes
		ME	1,70E-04	0,07	0,07017	kg 1,4-DB Eq.		0,24%		99,75%	N/A	N/A		Emissões/ Produção de Resina MDI
		HT	3,28	6,72	10	kg 1,4-DCB Eq.		33%		67%	N/A	N/A		Produção de químicos/Produção de resina MDI
		POF	0,14	1,72	1,86	kg NMVOC Eq.		8%		92%	N/A	N/A		Emissões/Produção de resina MDI
		TET	0,01	0,02	0,03	kg 1,4-DCB Eq.		33%		67%	N/A	N/A		Produção de eletricidade/produção de resinas
		FET	0,08	0,15	0,23	kg 1,4-DCB Eq.		35%		65%	N/A	N/A		Produção de químicos/ Emissões de metais/Produção de resina MDI
		FD	4,12	45,00	49,12	kg de óleo Eq.		8%		92%	N/A	N/A		Produção de Resina/ Produção de Químicos
Nakano et al. (2018)	PB	CC	310,80	133,20	444	kg de CO 2 eq.		70%		30%	N/A	N/A		Resina/Eletricidade/Outras utilidades
		AD	3,24	1,08	4,32	kg Sb eq.		75%		25%	N/A	N/A		Eletricidade
		HTNC	6,63E-06	1,04E-05	1,70E-05	CTU h		39%		61%	N/A	N/A		Calor(biomassa)/Resina
		HTC	1,10E-04	4,50E-05	1,55E-04	CTU h		71%		29%	N/A	N/A		Resina/eletricidade
		ET	1148	492,00	1640	CTU eco		70%		30%	N/A	N/A		Resina
	MDF	CC	173,90	61,10	235	kg de CO 2 Eq.		74%		26%	N/A	N/A		Resina/outras utilidades
		AD	1,78	0,34	2,12	kg Sb eq.		84%		16%	N/A	N/A		Eletricidade
		HTNC	6,78E-05	6,02E-05	1,28E-04	CTU h		53%		47%	N/A	N/A		Resina/ transporte de material(combustível)
		HTC	1,43E-04	8,80E-05	2,31E-04	CTU h		62%		38%	N/A	N/A		Resina/outras utilidades
		ET	2263,38	676,62	2940	CTU eco		77%		23%	N/A	N/A		Resina
Bergman et al. (2015)	OSB	GW	151,11	55,89	207	kg CO2- Eq.		73%		27%	N/A	N/A		Sem especificações
		AC	1,94	0,17	2,11	kgSO2- Eq.		92%		8%	N/A	N/A		Sem especificações
		EU	0,09	9,90E-03	9,99E-02	kg N- Eq.		95%		5%	N/A	N/A		Sem especificações
		OD	6,24E-07	1,23E-08	0,000000636	kg CFC-11- Eq.		99%		1%	N/A	N/A		Sem especificações
		SMOG	26,88	1,12	28	kg O3- Eq.		96%		4%	N/A	N/A		Sem especificações

Gonzales-Garcia et al (2019)	MDP (Brasil)	AD	3,40E-01	6,40E-01	9,80E-01	kg Sb eq	35%	65%	N/A	N/A		Produção de Resina UF e óleo combustível Pesado
		AC	9,80E-01	1,42E+00	2,40E+00	kg SO ₂ eq	41%	59%	N/A	N/A		Emissões
		EP	9,00E-02	3,00E-02	1,30E-01	kg PO ₄₋₃ eq	72%	18%	N/A	N/A		Uso de Fertilizantes e produção de resina
		GW	3,00E-02	3,30E+02	3,33E+02	kg de CO ₂ eq	1%	99%	N/A	N/A		Produção de eletricidade/ resina UF
		POC	9,00E-02	2,20E-01	2,80E-01	kg C ₂ H ₂ eq	34%	66%	N/A	N/A		Emissões de CH ₄ , CO, NO _x e VOCs
		EC	8,12E+01	8,20E-01	8,20E+01	PAF · m ³ · day	99%	1%	N/A	N/A		Uso de agroquímicos, como o glifosato nas atividades de manejo florestal
		HT	6,44E-07	2,68E-08	6,71E-07	Cases	4%	96%	N/A	N/A		Emissões de combustão
	MDP (Espanha)	AD	2,25E-01	6,70E-01	9,00E-01	kg Sb eq	25%	75%	N/A	N/A		Produção de cavacos (Uso de diesel e fertilizantes) e Produção de resina
		AC	3,00E-01	6,10E-01	9,20E-01	kg SO ₂ eq	33%	67%	N/A	N/A		Produção de cavacos/ Uso de diesel e fertilizantes
		EP	9,00E-02	1,38E-01	0,23	kg PO ₄₋₃ eq	40%	60%	N/A	N/A		Produção de cavacos/ Uso de diesel e fertilizantes
		GW	2,58E+01	1,89E+02	2,15E+02	kg de CO ₂ eq	12%	88%	N/A	N/A		Produção de cavacos/ Uso de diesel e fertilizantes
		POC	6,00E-02	6,70E-02	1,30E-01	kg C ₂ H ₂ eq	49%	51%	N/A	N/A		Emissões de combustão e formaldeído
		EC	1,80E+02	4,02E+02	5,82E+02	PAF · m ³ · day	31%	69%	N/A	N/A		Produção de cavacos/ Uso de diesel e fertilizantes
		HT	6,28E-06	7,22E-05	7,85E-05	Cases	8%	92%	N/A	N/A		Produção de cavacos/ Uso de diesel e fertilizantes

Alto nível de impacto

Nível intermediário de impacto

Baixo nível de impacto

O estudo desenvolvido por Silva *et al.* (2013) no ciclo de vida de painéis MDP produzidos no Brasil, abordou as categorias de impactos de: Depleção de recursos abióticos, Acidificação, Eutrofização, Aquecimento Global, Oxidação Fotoquímica, Ecotoxicidade e Toxicidade Humana. Neste estudo, os autores identificaram que a etapa de produção do painel na maioria das categorias analisadas é a etapa com maior incidência de impactos ambientais, sendo os principais *hotspots* para tais, o uso de óleo combustível pesado e a resina a base de ureia-formaldeído. Salvo na categoria de ecotoxicidade, onde a etapa de obtenção de matéria-prima apresentou um nível alto de impacto, justificado pelo uso do herbicida de glifosato durante a preparação das mudas, com um percentual de 99% dos impactos.

O estudo desenvolvido por Iritani *et al.* (2015) aplicou a técnica de ACV na produção de móveis à base de MDP, no Brasil, abordando as categorias de impacto: Aquecimento Global, Depleção de Ozônio, Oxidação Fotoquímica, Acidificação, Ecotoxicidade crônica (solo), Ecotoxicidade aguda (água), Ecotoxicidade crônica (água), Toxicidade humana (ar), Toxicidade humana (água), Toxicidade humana (solo), Enriquecimento de nutrientes. Com os dados disponíveis averiguou-se que a etapa de obtenção de matéria-prima apresentou predominância de impactos, justificando-se pelo fato de ser a fase de obtenção da matéria-prima do painel e produção do MDP. Este estudo, apresenta diversos *hotspots*, sendo destaque as emissões de formaldeído livres provenientes da resina utilizada na compactação do painel. As categorias de ecotoxicidade crônica, oxidação fotoquímica, toxicidade humana água e toxicidade humana ar, foram as que apresentaram níveis mais elevados de impacto, sendo explicados pela emissão de formaldeído livre durante a produção do MDP e, pela emissão de metais pesados durante a produção do aço usado na produção dos móveis.

Piekarski *et al.* (2017), aplicaram a técnica de ACV na produção de painéis de MDF produzidos no Brasil, abordando as categorias de impactos Acidificação, Aquecimento global, Ecotoxicidade, Formação fotoquímica de Ozônio Troposférico, Toxicidade Humana, Depleção de Recursos Abióticos, Depleção de Ozônio e Eutrofização. Pelas categorias analisadas, observou-se que os potenciais impactos ambientais são encontrados na fase de obtenção de matéria-prima, salvo nas categorias de EU, PFTO e AC. Os principais *hotspots* encontrados são gás natural, resíduos de madeira, transporte, energia elétrica e, a resina ureia-formaldeído.

O estudo realizado desenvolvido por Ferro *et al.* (2018) teve como objeto de estudo o ciclo de vida de painéis em painéis OSB abordando o contexto da produção brasileira, adotando as categorias de impactos: Mudanças climáticas, depleção de ozônio, acidificação terrestre, eutrofização de água doce, eutrofização marinha, toxicidade humana, formação de oxidantes fotoquímicos, ecotoxicidade terrestre, ecotoxicidade em água doce e esgotamento fóssil. Como resultado, a etapa de manufatura corresponde à maioria dos impactos gerados em todo o ciclo de vida abordado, independentemente da categoria de impacto analisada, apresentando como principais *hotspots*: emissões, resina (liberação de formaldeído livre), produção de resina e químicos. A etapa de obtenção de matéria-prima foi a responsável pelos impactos gerados nas categorias potencial de eutrofização de água doce (FE), potencial de depleção de ozônio (OD) e potencial de depleção fóssil (FD), justificado pelo uso de diesel nos maquinários florestais, especificamente na fase de colheita.

Nakano *et al.*(2018) aplicaram um estudo de ACV tendo como objeto do mesmo os painéis de aglomerado (PB), painéis de fibras (MDF), painéis de fibra dura (HB) e painéis de isolamento (IB) produzidos no Japão, adotando como categorias de impactos: mudanças climáticas, depleção de recursos abióticos, toxicidade humana (efeitos de câncer e não-câncer) e ecotoxicidade. Como este estudo visa apenas selecionar dados referentes aos painéis de madeira reconstituída como MDF, MDP e OSB, foram considerados apenas os resultados relacionados ao aglomerado e o MDF. Pelos valores obtidos, os potenciais impactos ambientais no aglomerado e MDF apresentam maior criticidade quando se trata de obtenção de matéria-prima. Tendo como principais *hotspots* a resina, a eletricidade e o fornecimento de matéria-prima.

O estudo realizado por Bergman *et al.* (2015) empregou a técnica de ACV em painéis de OSB, abordando as categorias de impacto Aquecimento global, Acidificação, Eutrofização, Depleção de Ozônio e Smog (Ozônio Fotoquímico), obtendo como resultado que os potenciais impactos ambientais gerados são encontrados na etapa de obtenção de matéria-prima, apresentando dados críticos em todas as categorias consideradas. Neste estudo, os autores não especificam os principais *hotspots* encontrados.

O estudo desenvolvido por Gonzáles-Garcia *et al.*, (2019) abordou a produção de painéis de MDP produzidos no Brasil e na Espanha. Estes dois estudos analisaram as categorias de impacto de Depleção abiótica, Acidificação, Eutrofização,

Aquecimento Global, Oxidação Fotoquímica, Ecotoxicidade e Toxicidade Humana. No contexto de produção Brasileiro, a produção da resina UF é o principal *hotspots* em diversas categorias, além das emissões da combustão de óleo pesado usado nas caldeiras para produzir calor e, emissões de formaldeído liberados na fabricação dos painéis. Já no cenário espanhol, destacam-se como principais geradores de impactos ambientais, a produção de cavacos, relacionados ao diesel utilizados nos picadores, outro contribuinte é a produção de resina UF.

Fundamentado nos estudos da perspectiva *cradle-to-gate*, constatou-se que na maioria dos estudos abordados, a fase que apresenta maiores impactos ambientais está relacionada a produção do painel, tendo como principais contribuintes para os potenciais impactos ambientais:

- A resina utilizada na compactação dos materiais que compõe o painel;
- O gás natural utilizado para geração de energia térmica;
- Transporte (combustíveis utilizados),
- Resíduos de madeira obtidos durante o processamento da madeira e,
- Energia Elétrica.

4.2.2 Perspectiva *Gate-to-Gate*

A perspectiva *gate-to-gate* tem por desígnio a avaliação da etapa que engloba a confecção do produto, no caso os painéis de madeira. Essa etapa está relacionada a tudo que acontece na delimitação portão ao portão da fábrica. Com isso, os estudos descritos no Quadro 8 apresentam os potenciais impactos ambientais relacionados a produção do painel, deixando de lado a etapa de obtenção de matéria-prima. Os resultados apresentados estão dispostos por estudos, tal como, os principais *hotspots* encontrados em cada categoria de impacto e, em seguida uma breve contextualização de cada um é abordado.

Quadro 8- Perspectiva Gate-to-Gate

Estudos	Tipo de painel	Categorias LCIA	Unidade	Obtenção de matéria-prima	Manufatura		Total	% Manufatura		Uso	Fim de vida	Porcentagem de impacto por fase do ciclo de vida	Hotspots
					Prep. Mad	Proc. Prod		Prep. Mad	Proc. Prod				
KOUCHAKI-PENCHAH et.al. (2016)	Particleboard (PB)	AD	kg Sb Eq.	N/A	1,69	2,39	4,13	42%	58%	N/A	N/A		Gás Natural, Eletricidade, Resina
		AC	kg SO 2 Eq.	N/A	0,74	1,05	1,82	42%	58%	N/A	N/A		Eletricidade, resina UF, transporte
		EP	kg PO -3 4Eq.	N/A	0,04	0,092	0,13	29%	71%	N/A	N/A		Resina (UF), transporte
		GW	kg de CO2 Eq.	N/A	221,99	204,32	433,11	53%	47%	N/A	N/A		Resina, Processo de produção, Eletricidade
		OLD	kg CFC11Eq.	N/A	5,00E-05	0,0000201	7,00E-05	71%	29%	N/A	N/A		Resina (UF), transporte
		HT	kg 1,4-DB Eq.	N/A	51,88	101	155,77	35%	65%	N/A	N/A		Resina (UF), eletricidade, transporte
		FE	kg 1,4-DB Eq.	N/A	9,14	22,68	32,19	30%	70%	N/A	N/A		Resina (UF), eletricidade, processo de produção
		ME	kg 1,4-DB Eq.	N/A	32051	48636,2	81951,3	41%	59%	N/A	N/A		Gás Natural, Eletricidade, Resina
		TE	kg 1,4-DB Eq.	N/A	0,17	1,592	1,76	10%	90%	N/A	N/A		Produção, Resina (UF)
		PO	kg C 2 H 4	N/A	0,08	0,4	0,49	18%	82%	N/A	N/A		Processo de Produção
KOUCHAKI-PENCHAH et.al. (2016)	MDF	AD	kg Sb Eq.	N/A	7,3	0,9	8,2	89%	11%	N/A	N/A		Gás natural, Electricidade, Transporte e Processo de Produção
		EP	kg PO -3 4 Eq.	N/A	0,3	0,0104	0,3104	97%	3%	N/A	N/A		Produção e Resina UF
		GW	kg CO2 Eq.	N/A	775	59,4	834,4	93%	7%	N/A	N/A		Produção e Resina UF
		OLD	kg CFC11 Eq.	N/A	2,44E-04	7,00E-07	2,45E-04	99%	1%	N/A	N/A		Gás natural, Electricidade, Transporte e Processo de Produção
		FE	kg 1,4-DB Eq.	N/A	54,5	15,9	70,4	77%	23%	N/A	N/A		Resina (UF)
		ME	kg 1,4-DB Eq.	N/A	139173,9	10148,8	149322,7	93%	7%	N/A	N/A		Resina (UF)
		HT	kg 1,4-DB Eq.	N/A	310,8	40,9	351,7	88%	12%	N/A	N/A		Resina (UF)
		AC	kg SO 2 Eq.	N/A	3,1	0,6	3,7	84%	16%	N/A	N/A		Gás natural, Electricidade, Transporte e Processo de Produção
		TE	kg 1,4-DB Eq.	N/A	3	0,4	3,4	88%	12%	N/A	N/A		Produção e Resina UF
		PO	kg C 2 H 4	N/A	1	0,3	1,3	77%	23%	N/A	N/A		Gás natural, Electricidade, Transporte e Processo de Produção
RIVELA et al.(2007)	MDF	HH	DALY*10^6	N/A	51,4	5	56,4	91%	9%	N/A	N/A		Subsistema de preparação da madeira
		EQ	PDF*m^2yr	N/A	74,1	4,1	78,2	95%	5%	N/A	N/A		Resina
		R	MJ surplus	N/A	318	20	338	94%	6%	N/A	N/A		Eletricidade

● Alto nível de impacto

● Nível intermediário de impacto

● Baixo nível de impacto

Pelo Quadro 8, o estudo elaborado por Kouchaki-Penchah *et al.* (2016) , aplicou o a técnica de ACV para painéis de MDF fabricados na República Islâmica do Irã, abordando as categorias de impactos: Acidificação, Depleção abiótica, Eutrofização, Aquecimento Global, Depleção da camada de Ozônio, Toxicidade Humana, Ecotoxicidade Terrestre e Oxidação Fotoquímica. Os resultados apresentados mostraram que os principais impactos ambientais estão vinculados a etapa de preparação das fibras, tendo como principal *hotspots* a resina, exceto nas categorias AC, AD, OLD e PO que o gás natural, a eletricidade, transporte e processo de produção, são os principais causadores dos impactos.

Ainda, os autores Kouchaki-Penchah *et al.* (2016), desenvolveram um segundo estudo, abordando os painéis de aglomerado (PB) produzidos na República Islâmica do Irã, abordando as categorias de impactos: Acidificação, Depleção abiótica, Eutrofização, Aquecimento Global, Depleção da camada de Ozônio, Toxicidade Humana, Ecotoxicidade Terrestre e Oxidação Fotoquímica. Neste estudo diferentemente do aplicado em MDF, é possível identificar que a etapa de montagem dos painéis foi mais crítica em relação à preparação das partículas, sendo os principais responsáveis pelo impacto, a resina, eletricidade, transporte e o gás natural.

O estudo desenvolvido por Rivela *et al.* (2007) para painéis de MDF, os resultados apresentaram que a etapa de preparação da madeira foi a mais impactante, sendo explicada, pelo fato de o subsistema ser dependente da eletricidade (contribuindo 91,1% para HH e 94,1% para R). Por outro lado, os impactos gerados na categoria EQ são provenientes da ureia-formaldeído utilizados para a preparação da madeira. Portanto, a contribuição deste subsistema representa 94,8% do processo.

Enfatizado nos estudos abordando o sistema *gate-to-gate*, identificou-se que os principais impactos ambientais encontrados pelos pesquisadores estão relacionados ao:

- Uso da resina á base de formaldeído e;
- Uso de combustíveis (geração de calor e transporte) e;
- Eletricidade.

Comparando os principais *hotspots* encontrados na perspectiva *cradle-to-gate* e *gate-to-gate* percebe-se que há similaridade, quantos aos causadores de impactos. A maioria dos estudos adotados em ambas as fronteiras do sistema apresentam que,

os principais impactos estão relacionados à confecção do painel, exceto ao uso de fertilizantes na produção florestal.

Visando a redução de tais impactos, identificados pela aplicação da técnica de ACV, a inserção da metodologia de economia circular visa contribuição significativa, pois a economia circular proporciona novas formas de produzir e consumir os produtos, o que implica na mudança racional das etapas do ciclo de vida que compõem os painéis de madeira. Neste contexto, pode-se afirmar que a ACV é uma técnica que quantifica os impactos ambientais relacionados a um sistema e, a economia circular é uma metodologia para a definição de cenários de melhorias de sistemas quantificados pela ACV. Além, de poder ser aplicada após a implementação dos modelos de economia circular a fim de quantificar os benefícios da EC.

Assim, relacionar os principais impactos encontrados no ciclo de vida dos painéis com os modelos de negócio de economia circular permite identificar onde ainda existem falhas no processo e, como podem ser modificadas.

No entanto, antes de relacionar os impactos aos modelos de negócio, analisou-se como o setor de painéis de madeira no contexto brasileiro se apresenta em relação à transição de economia, pois, pelos dados analisados nas seções anteriores, o mesmo apresenta questões ainda a serem consideradas e modificadas, para que, se institua em sua produção ações que cada vez mais o aproxime dos princípios de economia circular.

4.3 PRÁTICAS DE ECONOMIA CIRCULAR IDENTIFICADAS

Como contextualizado nas seções anteriores, a economia circular busca acabar com o “fim de vida” do produto, reduzir a geração de resíduos com a implementação dos 3 Rs (Reduzir, Reutilizar e Reciclar), aderir novos modelos de negócios e *ecodesing* e, utilizar matéria-prima proveniente de fonte renovável. Neste contexto, analisou-se novamente o sistema produtivo dos painéis de madeira dispostos na seção 4.1 e os relatórios de sustentabilidade, em busca de identificar ações que caracterizem práticas de economia circular. O Quadro 9 apresenta as práticas de economia circular identificadas nos sistemas produtivos de painéis de madeira identificadas nas análises realizadas.

Quadro 9- Práticas de economia circular identificadas no sistema produtivo de painéis de madeira

	Práticas Identificadas	Contribuições para a economia circular
1	A indústria de painéis de madeira trabalha com aproximadamente 89% de materiais de origem renovável	Redução de materiais de fontes não renováveis
2	100% da madeira utilizada na produção de painéis de madeira são provenientes de reflorestamento	
3	A indústria trabalha com a destinação 100% adequada dos resíduos pós- corte da madeira (galhos e fuste mantidos no solo, contribuindo com a proteção e fornecimento de nutrientes para os próximos plantios).	Reutilização de resíduos/ Redução de resíduos enviados a aterro
4	Destinação adequada dos resíduos obtidos no processamento da madeira (casca, pó e cavacos não selecionados), sendo estes encaminhados a caldeira da usina térmica, para a queima e fornecimento de energia aos processos dentro da fábrica.	Reutilização de resíduos/ Geração de energia / Redução de resíduos enviados a aterro
5	A indústria de painéis de madeira atua com matriz energética de fontes renováveis que abastece aproximadamente (80%)	Uso de energia de fonte renovável
6	Adaptações de equipamentos (caldeiras e secadores) para a utilização de biomassa em substituição ao gás liquefeito de Petróleo (GLP) para geração de calor, o que levou a redução do uso do combustível fóssil.	Mudanças no design de equipamentos a fim de uso de combustíveis renováveis
7	Trabalha com água superficial e subterrânea (quase 95%) captada em rios e poços artesianos instalados nas unidades	Menor utilização de água proveniente do abastecimento municipal ou de outras empresas de água
8	Aproximadamente 25% da água utilizada durante o processo é recuperada pelo sistema de tratamento de efluentes	Recuperação e reutilização de água
9	Recuperação das cinzas provenientes da queima da biomassa e, do lodo e compostos orgânicos gerados estação de tratamento de efluentes para compostagem, retornando como fertilizantes para o setor florestal.	Redução do uso de fertilizantes químicos

Como evidenciado no Quadro 9, a indústria de painéis de madeira já reúne atividades que consolidam primícias de circularidade, onde nada se perde, tudo se regenera.

4.4 ÍNDICE DE CIRCULARIDADE EM PAINÉIS DE MADEIRA

A seguir, estão descritos os resultados obtidos aplicando o indicador de circularidade MCI no sistema produtivo de painéis de madeira MDP, MDF e OSB, a fim de identificar a circularidade em cada processo.

4.4.1 Entrada de Material Virgem

Nesta etapa, foi aplicado o indicador de circularidade (MCI) no sistema de produção dos painéis de MDP, MDF e OSB. Para isso, os dados de entradas de materiais foram coletados em estudos de ACV em painéis de madeira desenvolvidos no Brasil, sendo:

- Os dados do painel MDP foram coletados no estudo intitulado: “Avaliação do ciclo de vida da produção do painel MDP no Brasil” (SILVA, 2012);
- Os dados do painel MDF foram coletados no estudo intitulado: “Proposta de melhoria do desempenho ambiental associado ao ciclo de vida da produção do painel de madeira MDF” (PIEKARSKI, 2013);
- Os dados do painel OSB foram coletados no estudo intitulado: “*Environmental aspects of oriented strandboards production. A Brazilian case study*” (FERRO et al., 2018).

A Tabela 2, dispõe da quantidade de materiais virgens que entram no sistema produtivo de 1 m³ de cada painel.

Tabela 2- Entrada de Materiais Virgens

(continua)

Produção de MDP		
Entradas de materiais (Kg)		Material Virgem (V)
Resina UF	7,17E+01	7,17E+01
Sulfato de amônio	1,38E+00	1,38E+00
Parafina	5,47E+00	5,47E+00
Água	8,67E+01	8,67E+01
Madeira	6,87E+02	6,87E+02
Total	852,25	852,25
Massa do painel MDP (Kg)		630

Fonte: (Silva, 2012)

(conclusão)

Produção de MDF		
Entradas de materiais (Kg)		Material Virgem (V)
Cavaco de madeira	6,98E+02	6,98E+02
Parafina	3,40E+00	3,40E+00
Resina UF	7,03E+01	7,03E+01
Sulfato de Amônio	1,00E-01	1,00E-01
Ureia	8,00E-01	8,00E-01
Total	7,73E+02	7,73E+02
Massa do painel MDF (Kg)		683,2
Fonte: (Piekarski, 2013)		
Produção de OSB		
Entradas de materiais (Kg)		Material Virgem (V)
Madeira	9,67E+02	9,67E+02
Resina MDI	1,47E+01	1,47E+01
Parafina	0,7E+01	0,7E+01
Termicida Piretróide	9,6E-01	9,6E-01
Agente desmoldante	7,0E-01	7,0E-01
Água	2,97E-01	2,97E-01
Total	9,91E+02	9,91E+02
Massa do painel OSB (Kg)		600
Fonte: Ferro et al. (2018)		

Os dados dispostos na Tabela 2, demonstram que para cada sistema produtivo de painéis de madeira a quantidade de matéria-prima utilizada é diferente. Outros estudos e outros dados poderão apresentar variações. Inclusive isso pode variar de processo para processo.

Nestes três estudos abordados a porcentagem de material virgem empregado é 100%, caracterizando uso primário de material em todo o sistema, ou seja, produtos que ainda não foram processados ou reprocessados, geralmente provenientes de fontes não renováveis. Salvo os resíduos de madeira que são provenientes da usinagem da madeira e, enviados à caldeira da indústria para a geração de energia térmica, consumida nos secadores e prensa. No caso do painel MDP e OSB foram considerados a quantidade de água utilizada do processo, devido à mesma ser utilizada na encoladeira para o processo de encolagem das partículas.

4.4.1.1 Resíduos Irrecuperáveis (W_0) de MDP-MDF-OSB destinados a aterro

Para o cálculo de resíduos irrecuperáveis adotou-se cenários (porcentagem de produto que entra em processo de reutilização - C_u), sendo que os painéis de MDP-MDF e OSB são reutilizados visando à confecção de pequenos objetos de decoração,

prateleiras, brinquedos, entre outros. Assim como não se tem uma porcentagem exata de reutilização destes produtos na literatura, propuseram-se cenários, dispostos na Tabela 4, e, a fração de material coletado para o processo de reciclagem- C_r é considerado nulo em todo o processo, devido ainda não existir a abordagem desse processo para os painéis de madeira na literatura.

A partir dos cenários estabelecidos, calculou-se a quantidade gerada de resíduos irre recuperáveis para os três painéis de madeira, que serão enviados ao aterro. Os dados de resíduos irre recuperáveis relacionados aos painéis de madeira foram obtidos utilizando a equação 2 e apresentados na Tabela 4.

Tabela 3- Resíduos Irrecuperáveis

Cenários (C_u)	W_0 MDP (Kg)	W_0 MDF (Kg)	W_0 OSB (Kg)
0	630	683,2	600
5%	598,5	648,18	570
10%	567	614,88	540
20%	504	546,56	480
50%	315	341,6	300
100%	0	0	0

Conforme a Tabela 5 pode-se observar que com o aumento da reutilização dos painéis há uma redução considerável da quantidade de resíduos irre recuperáveis que tem como fim de vida o aterro.

4.4.1.2 Resíduos irre recuperáveis gerados na etapa de reciclagem do MDP- MDF- OSB

Nesta etapa de quantificação de resíduos irre recuperáveis gerados no processo de reciclagem do MDP-MDF-OSB pela Equação 3, mesmo abordando a escala de variação entre (0 e 100%) de eficiência do processo de reciclagem, temos que a quantidade de resíduos irre recuperáveis é nulo, sendo explicado pelo fato da fração de massa do MDP coletado para entrar no processo de reciclagem (C_r) não ser adotado por nenhuma indústria e, nem apresentar estudos na literatura relacionado a reciclagem destes, sendo considerado nulo.

4.4.1.3 Resíduos gerados para a produção de determinado conteúdo reciclado usado como matéria-prima (W_F).

Pela Equação 4 é possível identificar a massa de resíduos irrecuperáveis gerados ao produzir matéria-prima reciclada para novos produtos, no entanto, como anteriormente descrito ainda não existem abordagens de reciclagem para os painéis de madeira, o mesmo é considerado nulo.

4.4.1.4 Rejeitos totais irrecuperáveis (W)

A partir dos dados relacionados à geração de resíduos irrecuperáveis (W_0 , W_f e W_c) é possível calcular, pela Equação 5, a quantidade total de rejeitos irrecuperáveis relacionados a 1m^3 de cada painel. Os resultados (W) são apresentados na Tabela 5.

Tabela 4- Rejeitos totais irrecuperáveis

C_u	MDP				MDF				OSB			
	W_0	W_F	W_c	W (Kg)	W_0	W_F	W_c	W (Kg)	W_0	W_F	W_c	W (Kg)
0	630	0	0	630	683,2	0	0	683,2	600	0	0	600
5%	598,5	0	0	598,5	648,18	0	0	648,18	570	0	0	570
10%	567	0	0	567	614,88	0	0	614,88	540	0	0	540
20%	504	0	0	504	546,56	0	0	546,56	480	0	0	480
50%	315	0	0	315	341,6	0	0	341,6	300	0	0	300
100%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Pela Tabela 5, observa-se que como não se tem resíduos irrecuperáveis relacionados à reciclagem, a quantidade total de rejeitos irrecuperáveis é a mesma da destinada ao aterro. Essa mudança só irá ocorrer, caso se inicie processos de reciclagem em painéis de madeira, ocasionando então, variações na quantidade de rejeitos.

4.4.1.5 Índice de Fluxo Linear (LFI)

A partir da obtenção dos dados de rejeitos irrecuperáveis de cada produto, foi possível calcular o índice de linearidade de cada painel de madeira, adotando a Equação 6. Os dados obtidos são dispostos na Tabela 6.

Tabela 5- Índice de Fluxo Linear

MDP					MDF					OSB				
V(kg)	M(kg)	Cu(%)	W(kg)	LFI	V(kg)	M(kg)	Cu(%)	W(kg)	LFI	V(kg)	M(kg)	Cu(%)	W(kg)	LFI
852,25	630	0	630	1	773	683,2	0	683,2	1	967	600	0	600	1
		5	598,5	1			5	648,18	1			5	570	1
		10	567	1			10	614,88	1			10	540	1
		20	504	1			20	546,56	0,96			20	480	1
		50	315	0,93			50	341,6	0,82			50	300	1
		100	0	0,68			100	0	0,57			100	0	0,81

Na Tabela 6, estão dispostos os dados relacionados à linearidade de cada painel de madeira, os quais são dependentes da quantidade de material virgem que entra no processo, quantidade de resíduos irrecuperáveis e massa final do produto. É possível observar que a entrada de insumos para a produção de cada painel é superior à massa final do produto, explicado pelo fato de existir perdas durante o processo de manufatura. Nota-se que quanto maior a entrada de insumos virgem no processo, maior será a porcentagem de reutilização para que a linearidade comece a reduzir.

O sistema produtivo de MDP começa a reduzir a linearidade quando 50% do produto começam a ser reutilizado, já o painel de MDF com 20% de reutilização do produto e, o OSB com 100% de reutilização. Isso se deve pelo fato do OSB apresentar uma elevada quantidade de insumos virgens entrando no processo e sua massa final totalizar 2/3 destes, apresentando perda de 1/3 de material, caracterizando-o com completamente linear, enquanto, que os demais apresentam indícios de circularidade, pelo fato das perdas durante a manufatura ser inferiores ao do OSB.

4.4.1.6 Fator Utilidade (**F(X)**)

O fator utilidade foi determinado conforme a equação 7, sendo adotado como parâmetro de vida útil do MDP- MDF-OSB uma variação de 5, 10 e 15 anos, tempo este especificado por estudos científicos e empresas. A determinação do tempo de vida útil de produtos similares foi determinada buscando informações mediante literatura. O número médio de unidades funcionais durante a fase de uso dos painéis e, o número médio de unidades funcionais de produtos similares foram considerados 1, devido a aplicabilidade. Os dados obtidos pela Equação 8 estão dispostos na Tabela 7.

Tabela 6- Fator utilitário

<i>L</i>	<i>L_{av}</i>	<i>U</i>	<i>U_{av}</i>	<i>X</i>	<i>F(X)</i>
5	10	1	1	0,5	1,8
10	10	1	1	1	0,9
15	10	1	1	1,5	0,6

Pela Tabela 7, é possível observar que com o aumento da vida útil dos painéis, ocorre redução o fator utilidade.

4.4.1.7 Índice de Circularidade (MCI)

Após a obtenção dos dados necessários para determinar a circularidade, propôs-se cenários de tempo de vida útil dos painéis MDP-MDF-OSB, sendo estes, 5, 10 e 15 anos. O Índice de circularidade foi determinado utilizando a Equação 8 e 9 e, os dados obtidos estão apresentados na Tabela 8.

Tabela 7- Níveis de circularidade

<i>Cu</i> (%)	MDP			<i>Cu</i> (%)	MDF			<i>Cu</i> (%)	OSB		
	MCI-5 anos	MCI-10 anos	MCI-15 anos		MCI-5 anos	MCI-10 anos	MCI-15 anos		MCI-5 anos	MCI-10 anos	MCI-15 anos
0	0	0,1	0,4	0	0	0,1	0,4	0	0	0,1	0,4
5	0	0,1	0,4	5	0	0,1	0,4	5	0	0,1	0,4
10	0	0,1	0,4	10	0	0,1	0,4	10	0	0,1	0,4
20	0	0,1	0,4	20	0	0,13	0,42	20	0	0,1	0,4
50	0	0,16	0,44	50	0	0,26	0,51	50	0	0,1	0,4
100	0	0,4	0,6	100	0	0,5	0,66	100	0	0,1	0,51

Como apresentado na Tabela 8, os três painéis de madeira começam a apresentar circularidade em 10 anos de uso do produto, aumentando gradativamente com o aumento da reutilização do produto, explicado pelo tempo de compensação do consumo de insumos e energia envolvidos no ciclo de produção de cada input, o que não ocorre em 5 anos. Essa compensação ocorre pelo fato de o produto estar sendo utilizado por mais tempo e diversas vezes com os mesmos insumos.

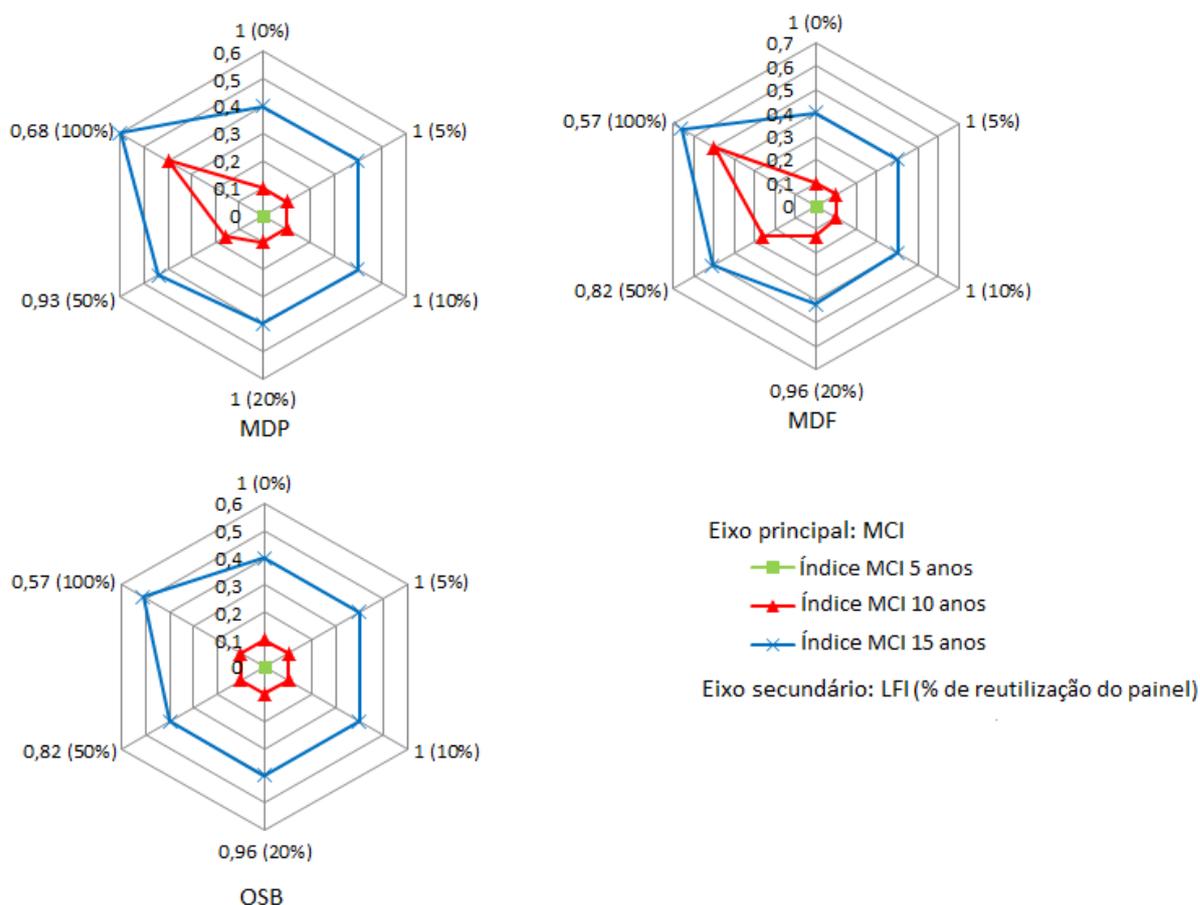
Observa-se ainda, que em nenhum produto a circularidade chegou a totalizar 100%, devido à quantidade de material virgem empregado na fabricação do produto, as perdas existentes durante o processamento, índice elevado de produtos seguindo ao aterro e, por não apresentar processo de reciclagem, o qual contribuiria significativamente com a redução de materiais seguindo ao aterro e, ao uso de

materiais virgens. Nota-se ainda pela Tabela 8, que o painel MDF começou a apresentar circularidade com uma menor porcentagem de reutilização que os demais, fato explicado pela menor taxa de variação entre a entrada de insumos e a massa final do produto, caracterizando-o com menor perda de materiais durante o processamento.

Enquanto os sistemas produtivos, destes casos, apresentarem apenas o uso de insumos de origem primária, recursos de fontes não renováveis e, não empregar a reciclagem, a circularidade estará distante de 100%. Cabe ressaltar que estes dados valem apenas para os três estudos empregados neste trabalho, sendo que em outros os resultados poder apresentar diferença.

O Gráfico 3 apresenta a relação entre a linearidade e a circularidade dos três painéis analisados.

Gráfico 3- Cenários de circularidade dos painéis de madeira



Como apresentado no Gráfico 3, o painel MDF apresenta maior circularidade em relação ao MDP e OSB em todos os cenários de reutilização propostos. Seguido pelo painel MDP e por fim o OSB, em todos os anos de utilização aplicados, exceto

em 5 anos que nenhum deles apresentou circularidade, devido a não compensação da quantidade de material virgem e reutilizado entrando no sistema produtivo, pelo tempo de uso do painel. Considerando a linearidade dos três painéis o OSB é destaque neste quesito, sendo um dos contribuintes a maior perda de material em relação aos demais, seguido pelo MDP classificando-se como intermediário e, por último o MDF. Essa linearidade, pode ser reduzida através da implementação do processo de reciclagem de painéis de madeira, além da reutilização, pois com a redução de desperdícios de materiais no processo produtivo e redução de entrada de materiais primários, conseqüentemente, haverá aumento da circularidade.

4.5 MODELOS DE NEGÓCIOS NO SISTEMA PRODUTIVO DE PAINÉIS

Como observado nas seções anteriores de resultados, o sistema produtivo de painéis de madeira apresenta lacunas que devem ser supridas para que o sistema produtivo se caracterize como circular. Então nesta seção, identificou-se como a produção de painéis se apresenta diante dos modelos de negócio estabelecidos pela CEO GUIDE (2017), os quais atuam como implementação da EC (Figura 16).

Figura 16- Modelos de negócios de economia circular no sistema produtivo de painéis de madeira

Modelos de Negócios	Práticas Identificadas	Potenciais Práticas
 Materiais Circulares	<ul style="list-style-type: none"> - Uso de madeira, água; - Uso de energias renováveis (queima da biomassa/solar) 	<ul style="list-style-type: none"> - Uso de resinas verdes; - Uso de resíduos agroindustriais; - Uso da lignina como proveniente do processo de polpação como parte da resina;
 Recuperação de recursos	<ul style="list-style-type: none"> - Uso de resíduos de madeira para a geração de energia térmica; - Uso de painéis em não conformidade como pallets ou pequenos objetos; - Uso do lodo do tratamento de efluentes como fertilizante; - Reinservação de água recuperada no processo 	<ul style="list-style-type: none"> - Recuperação de painéis pós-uso ou não conformes como matéria-prima para wood plastic composite ou wood cement composite
 Extensão da vida do produto	<ul style="list-style-type: none"> - Aplicação de materiais que aumentam a vida útil dos painéis de madeira; - Revestimento 	<ul style="list-style-type: none"> - Tratamento térmico em estufa ou prensa; - Inserção de nanopartículas; - Revestimentos (Imersão, Plasma frio, sol-gel); - Manutenção de componentes (Puxadores, dobradiças,...)
 Plataforma de compartilhamento	Não Identificada	<ul style="list-style-type: none"> - Plataforma Digital; - Peer-to-peer
 Produtos como serviços	Não Identificado	<ul style="list-style-type: none"> - PSS

Fonte: Autoria própria

Como apresentado na Figura 15, três modelos de negócios de EC estão presentes no sistema produtivo de painéis de madeira, sendo: Materiais Circulares e Recuperação de Recursos e Extensão da vida do produto.

O modelo de “materiais circulares” é representado pelo uso de madeira e água, além do uso de energias renováveis, assim, visando melhoria deste modelo de negócio e, redução do uso de insumos primários, propuseram-se potenciais práticas de inserção, consistindo em:

- Uso de resinas verdes (TANG *et al.*, 2011; YONGHWA *et al.*, 2011; AMINI *et al.*, 2013; MOURABIK *et al.*, 2013; CHOTIKHUN *et al.*, 2017; LI *et al.*, 2018) que visam à redução de impactos ambientais, pois são provenientes de base biológica, permitindo que os painéis sejam facilmente reciclados ou reutilizados;
- Produzir compósitos de madeira com a inserção de resíduos agroindustriais é uma solução efetiva para o desenvolvimento sustentável e técnico como apresentam os estudos (HABIBI *et al.*, 2008; BEKHTA *et al.*, 2013, SILVA *et al.*, 2015; GUIMARÃES, 2017). Os resíduos agrícolas são provenientes de embalagens de adubo, defensivos agrícolas, ração e restos de colheita da produção agrícola tais como, restos da colheita de milho, arroz, soja, cana-de-açúcar, feijão e trigo. Logo, além de contribuírem com a destinação adequada dos resíduos agrícolas, os mesmos contribuem para a redução da entrada de insumo virgem na produção de painéis de madeira.
- Uso da lignina obtida no processo de polpação da madeira (MAGALHÃES *et al.*, 2019), como substituta de parte da resina aglutinante, atualmente utilizada para compactação do painel, a qual tende a reduzir os impactos ambientais gerados pelo uso exclusivo da resina sintética.

O modelo de “recuperação de recursos” é caracterizado pelo uso de resíduos madeireiros para a geração de energia térmica, uso de painéis em não conformidade como pallets ou pequenos objetos, uso do lodo do tratamento de efluentes como fertilizante e, reinserção de água recuperada no processo, no entanto, ainda há oportunidades que visam à melhoria deste modelo de negócio, tais como:

- Recuperação de painéis pós-uso ou não conformes como matéria-prima para a produção de *wood plastic composite* ou *wood cement composite*, os quais relacionam os resíduos de madeira, plástico ou cimento.

O modelo de negócio “extensão da vida do produto” é caracterizado no sistema produtivo de painéis de madeira pela aplicação de materiais como, cupinicida, que tem por intuito reduzir ou extinguir o ataque de agentes xilófagos, e, hidrofóbicos, como a melanina, que tem por objetivo controlar o teor de umidade da chapa durante o uso, processo já utilizado nas indústrias. Outros materiais hidrofóbicos, já estão sendo estudados como forma de aumentar o tempo de vida útil do produto, tais como, borracha de pneu (VILELA, 2016), bagaço de cana de açúcar (YANG, 2006), além de diversos materiais poliméricos. Contudo, ainda há outras possibilidades para aumentar a durabilidade do painel de madeira:

- Tratamento térmico em estufa ou prensa: o tratamento térmico dos painéis de madeira busca uma forma mais sustentável de tratamento quanto ao ataque de agentes xilófagos, aumentando assim, a durabilidade das chapas em uso.
- Inserção de nanopartículas: As quais têm por finalidade reduzir o ataque de fungos, além de minimizar as emissões de formol ao meio ambiente. As nanopartículas disponíveis comercialmente no mercado são a nanosílica, o nanotubo de carbono e a nanoalumina (MAGALHÃES; CARDEMOTORI, 2018).
- Revestimentos: Estudos disponíveis na literatura mostram que reduzir ou eliminar problemas relacionados à durabilidade dos materiais que compõem o painel de madeira quando em serviço, estão relacionados ao revestimento aplicado. Sendo os mais estudados, revestimento por imersão (CHANG *et al.*, 2015; TU *et al.*, 2016), deposição de filmes por plasma frio (PROFILI *et al.*, 2017) e, revestimento por método sol-gel (WANG *et al.*, 2013).
- Manutenção dos produtos: Esta etapa pode ser inserida pela indústria que disponibiliza o produto, oferecendo serviços a fim de que o painel de madeira permaneça por mais tempo em uso, por meio de reparos em folhas de revestimentos, trocas de dobradiças, puxadores, entre outros.

O modelo de economia circular “plataforma de compartilhamento” ainda não esta presente na literatura quando se fala em painéis de madeira e derivados, porém, algumas possibilidades podem ser alocadas, tais como:

- Plataforma digital: Onde usuários de produtos a base de painel de madeira possam ofertar os mesmos a outras pessoas, quando não lhes forem mais úteis. Por exemplo, um usuário resolve trocar seu guarda roupa e, não sabe o que fazer com

o antigo, então se cadastra nesta plataforma digital e divulga seu produto até encontrar alguém interessado. Essa plataforma atuará como um site de vendas, com ou sem retornos monetários, isso irá depender do usuário que está disponibilizando o produto. A pessoa que adquirir o produto poderá usá-lo como guarda-roupa, ou poderá transformá-lo em outros produtos.

- O compartilhamento *peer-to-peer*: Permite aumento no poder de compra, na medida em que as pessoas são capazes de monetizar seus ativos ociosos (a um custo marginal mínimo, permitindo que produtos e, serviços sejam oferecidos a preços baixos).

E por fim, o modelo de negócio “produtos como serviço” empregado em painéis de madeira e derivados, sendo algumas oportunidades disponíveis ligadas aos produtos moveleiros e, de construção civil. No caso dos móveis, os mesmos podem ser oferecidos como serviços, sendo os mesmos fabricados por uma determinada empresa e ofertadas aos clientes em forma de aluguel, sendo a empresa a responsável por todo o procedimento de instalação, manutenção e retirada do produto ao fim do contrato. Assim, deve ocorrer também, com os produtos relacionados à construção civil.

4.6 SÍNTESE DOS RESULTADOS

Após a realização de todas as etapas de resultados: Mapeamento do ciclo de identificação dos principais *hotspots* ligados ao ciclo de vida dos painéis de madeira, identificação das práticas de economia circular, cálculo do índice de circularidade de cada painel e, a relação com os modelos de negócios, constatou que o sistema produtivo de painéis de madeira já apresenta atividades de economia circular e, também potenciais, definidas respectivamente como, práticas identificadas e potenciais práticas.

Portanto, as práticas identificadas de economia circular para painéis de madeira são:

- Madeira proveniente de reflorestamento;
- Recuperação energética de resíduos madeireiros para a geração de energia;
- Uso de energias renováveis;

- Aplicação de produtos que aumentam a vida útil dos painéis de madeira¹;
- Uso de painéis não conformes como pallets ou pequenos objetos

E as potenciais práticas de economia circular para painéis de madeira são:

- Uso de resinas verdes;
- Uso de resíduos agroindustriais;
- Uso da lignina proveniente do processo de polpação como parte da resina;
- Recuperação de painéis pós- uso ou não conformes como matéria-prima para *wood plastic composite* ou *wood cement composite*;
- Inserção de nanopartículas;
- Tratamento térmico em estufa ou prensa;
- Revestimentos (Imersão, plasma frio, sol-gel);
- Manutenção de componentes (Puxadores);
- Plataforma Digital;
- *Peer-to-peer*;
- *PSS - Product Service System*.

Acima estão apresentadas as potenciais práticas de economia circular no sistema produtivo de painéis de madeira que possuem condição de aumentar em até 70% a circularidade dos mesmos, em 15 anos. No entanto, a inserção de novos componentes como a lignina proveniente da polpação celulósica, os revestimentos por imersão, plasma frio e sol-gel, ou até mesmo resíduos agroindústrias podem piorar o desempenho ambiental e aumentar a vida útil em pequena proporção, para isso, é necessário à realização de uma ACV comparativa de compósitos utilizando estes produtos a fim de balancear a circularidade com os impactos gerados e, analisar o ponto de equilíbrio entre essas duas vertentes.

¹ É recomendado que estudos futuros realizem ACV comparativa com e sem a utilização de compósitos e materiais que aumentam a vida útil do painel a fim de comparar a circularidade com desempenho ambiental do produto.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O desenvolvimento deste estudo foi baseado no objetivo geral de Identificar práticas de economia circular atuais e potenciais para o sistema produtivo de painéis de madeira. Neste contexto buscou-se primeiramente na literatura pesquisas relacionadas ao tema, no entanto, observou-se que os temas de economia circular em painéis de madeira ainda são incipientes. Foi realizado um levantamento considerando os estudos relacionados à avaliação do ciclo de vida dos painéis de madeira, pelos quais foi possível identificar os principais *hotspots* por fase do ciclo de vida do painel, possibilitando propor soluções ambientais e atividades, a fim de fomentar modelos de negócios vinculados à economia circular.

Este trabalho identificou ações para incluir a circularidade em um sistema produtivo de painéis de madeira, a fim de aumentar a eficiência de processos e, reduzir desperdícios, aliado a minimização de potenciais impactos ambientais do ciclo de vida para ações efetivas de economia circular. Mediante a isto, o sistema produtivo de painéis de madeira estará adotando práticas de uma produção mais limpa, que poderá contribuir com o desenvolvimento sustentável, ligados principalmente aos ODS 12 e 13, que corroboram padrões de produção e consumo sustentáveis e, visam medidas em combate às mudanças climáticas. Além de trazer benefícios a sociedade, ao entregar um produto mais limpo com a mesma eficiência ou até mesmo superior e, ainda fomentar o ODS 8, emprego pleno, produtivo e trabalho decente para todos.

No cenário atual, aumentar a circularidade de sistema produtivo é sinônimo de reduzir o uso de produtos provenientes de fontes primárias, fontes não renováveis, os quais causam o esgotamento dos recursos planetários e podem comprometer a vida das gerações futuras. Mediante a isto, com dados obtidos do sistema produtivo dos painéis de madeira MDP, MDF e OSB calculou-se o índice de circularidade de cada produto e, pôde-se observar que nenhum dos três painéis apresenta circularidade quando o tempo de uso é de 5 anos, explicado pelo fato do tempo ser muito curto para a compensação dos insumos consumidos na produção. Já, em 10 anos de vida útil, os painéis começam a apresentar circularidade, que conseqüentemente se tornam crescentes quando a porcentagem de reutilização e os anos de uso do produto aumentam.

Ainda constatou-se, que nenhum produto apresentou circularidade de 100%, devido ao input de insumos de origem virgem e, perdas durante o processo produtivo.

Com isso, percebe-se que a produção de painéis de madeira carece de medidas e, atividades que fomentem a economia circular. Neste cenário, os modelos de negócios de economia circular foram relacionados ao sistema produtivo de painéis de madeira, a fim de analisar como a economia circular está presente, constatando assim, a presença de indícios que caracterizam três dos cinco modelos analisados. Embasado no fomento da economia circular propôs-se atividades que contribuem com a inserção dos demais modelos de negócio, que conseqüentemente aumentarão a circularidade neste setor.

Assim, com o presente estudo foi possível mapear o ciclo de vida dos três painéis estudados e, em seguida identificar os principais *hotspots* relacionados ao ciclo de vida, identificar as atividades ambientais que se caracterizam práticas de economia circular e, calcular o índice de circularidade de cada painel para os dados obtidos nos estudos de ACV, e, por fim relacionar as práticas identificadas aos cinco modelos de negócios de economia circular, pelos quais também foram identificadas novas propostas de práticas de economia circular que se encaixam em tais modelos.

As atividades já existentes identificadas neste estudo foram denominadas práticas identificadas, sendo elas:

- Uso de madeira proveniente de reflorestamento;
- Recuperação energética de resíduos madeireiros para a geração de energia;
- Uso de energias renováveis;
- Aplicação de materiais que aumentam a vida útil dos painéis de madeira;
- Uso de painéis não conformes como pallets ou pequenos objetos.

E as novas oportunidades de atividades relacionadas à economia circular foram denominadas potenciais práticas, caracterizadas em:

- Uso de resinas verdes;
- Uso de resíduos agroindustriais;
- Uso da lignina;
- Recuperação de painéis pós- uso ou não conformes como matéria-prima para *wood plastic composite* ou *wood cement composite*;
- Tratamento térmico em estufa ou prensa;
- Inserção de nanopartículas;
- Revestimentos (Imersão, plasma frio, sol-gel);
- Manutenção de componentes (Puxadores, dobradiças,...);
- Plataforma Digital;

- *Peer-to-peer*
- *PSS - Product Service System.*

Mediante a isto, o fomento da economia circular no sistema produtivo de painéis de madeira, poderá permitir a redução de impactos ambientais relacionados ao uso demasiado de matéria-prima proveniente de fontes não renováveis, o retorno do produto para novamente ser reinserido no processo como parte de material, ou como biomassa para geração de energia, o qual visa à redução do uso de energias proveniente de fontes não renováveis, entretanto, recomenda-se realizar estudos prévios de ACV para balancear a circularidade com os potenciais impactos ambientais.

Com os resultados apresentados neste trabalho, nota-se que o sistema de produção de painéis de madeira já caminha rumo à economia circular, pois adotam ações que permitem tais indícios, no entanto, esta circularidade ainda é pequena, mas apresenta grande potencial de crescimento. A economia circular inserida neste sistema produtivo trará grandes contribuições ambientais e sociais e, num futuro não tão distante ganhos financeiros.

5.1 SUGESTÕES PARA ESTUDOS FUTUROS

- Análise de viabilidade financeira da economia circular neste setor;
- Realizar a ACV de novas implementações que promovem circularidade;
- Desenvolver soluções de novos modelos de negócios circulares para o setor;
- Criar uma ferramenta específica para medir a circularidade neste setor;
- Aplicar à avaliação social do ciclo de vida neste setor e analisar o quanto a economia circular influencia na esfera social.

REFERÊNCIAS

- ABIMCI- Estudo setorial 2009 Ano Base 2008: **Indústria de Madeira Processada Mecanicamente**. 2009. Disponível em: <<http://www.abimci.com.br/wp-content/uploads/2014/02/2009.pdf>>. Acesso em: 20 set. 2018.
- ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). **NBR: 14810- 2**. Chapas de madeira aglomerada: requisitos. Rio de Janeiro, 2013.
- ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). **NBR: 15316**. Painéis de fibras de média densidade: requisitos. Rio de Janeiro, 2009.
- ABIPA (Associação Brasileira de Painéis de Madeira) - **ABIPA 2010**. Disponível em: <<http://pbqp-h.cidades.gov.br/download.php?doc=5a21968e-27ac-4f28-bf2b-38edbf26bc9a&ext=.pdf&cd=3079>>. Acesso em: 07 out. 2018.
- ABIPA (Associação Brasileira de Painéis de Madeira) - **ABIPA 2012b**. Disponível em: <<http://abipa.org.br/produtosMDP.php>>. Acesso em: 07 out. 2018.
- ABIPA (Associação Brasileira de Painéis de Madeira) - **ABIPA 2013**. Disponível em: <<http://pbqp-h.cidades.gov.br/download.php?doc=5a7b585e-8494-41d5-8eb7-8829306ff57e&ext=.pdf&cd=2641>>. Acesso em: 07 out. 2018.
- ADEL, A. M.; AHMED, E. O.; IBRAHIM, M. M.; El-Zawawy, W. K.; Dufresne, A. Microfibrillated cellulose from agricultural residues. Part II: Strategic evaluation and market analysis for MFCE30. **Industrial Crops and Products**, v.93, p.175-185, 2016.
- ALBUQUERQUE, C.E.C.; MENDES, L. M. OSB: processo industrial e considerações. **Revista da Madeira**, v. 8, p. 56-66, 2000.
- ALWISY, A.; BU HAMDAN, S.; BARKOKEBAS, B.; BOUFERGUENE, A.; AL-HUSSEIN, M. A BIM-based automation of design and drafting for manufacturing of wood panels for modular residential buildings. **International Journal of Construction Management**, v.19, p.187-205, 2019.
- AMINI, M. H. M.; HASHIM, R.; HIZIROGLU, S.; SULAIMAN, N. S.; SULAIMAN, O. Properties of particleboard made from rubberwood using modified starch as binder. **Composites Part B: Engineering**, v. 50, p. 259-264, 2013.
- APA – **The Engineered Wood Association**. Engineered Wood Construction Guide Excerpt: Structural Composite Lumber Excerpt from the Engineered Wood Construction Guide. 2011.
- APRE- **Estudo Setorial 2017-2018**. 2018. Disponível em: <http://www.apreflorestas.com.br/wp-content/uploads/2018/02/Estudo-Setorial-2018_APRE.pdf>. Acesso em: 18 set. 2018.

- ARAÚJO, C. K. D. C.; SALVADOR, R.; PIEKARSKI, C. M.; SOKULSKI, C. C.; DE FRANCISCO, A. C.; CAMARGO, S. K. D. C. A. Circular economy practices on wood panels: A bibliographic analysis. **Sustainability**, v. 11, p. 1041-1057, 2019.
- BAL, B. C.; DUMANOĞLU, F. Surface Roughness and Processing Time of a Medium Density Fiberboard Cabinet Door Processed via CNC Router, and the Energy Consumption of the CNC Router. **BioResources**, v.14, p. 9500-9508, 2019.
- BARBIRATO, G.; FIORELLI, J.; MEJIA, J.; SARASINI, F.; TIRILLÒ, J.; FERRANTE, L. Quasi-static and dynamic response of oriented strand boards based on balsa wood waste. **Composite Structures**, v. 219, p. 83-89, 2019.
- BARMINAS, J. T.; OSEMEAHON, S. A. Preparation and characterization of a low-formaldehyde-emission methylol urea/triethanolamine copolymer composite. **Journal of applied polymer science**, v. 116, n. 2, p. 645-653, 2010.
- BARRERO, N. M. G. **Estudo da durabilidade de painéis de partículas de bagaço de cana de açúcar e resina poliuretana a base de óleo de mamona para aplicação na construção civil**. 2015. 229 f. Tese (Doutorado) - Curso de Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, Desenvolvimento, Caracterização e Aplicação de Materiais Voltados à Agroindústria, USP, Pirassununga, 2016.
- BARROS FILHO, R. M. **Painéis aglomerados a base de bagaço de cana-de-açúcar e resinas uréia-formaldeído e melamina-formaldeído**. 2009. 99 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) -Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2009.
- BEKHTA, P.; KORKUT, S.; HIZIROGLU, S. Effect of pretreatment of raw material on properties of particleboard panels made from wheat straw. **BioResources**, v. 8(3), p. 4766-4774, 2013.
- BELINI, U. L.; TOMAZELLO FILHO, M. Avaliação tecnológica de painéis MDF de madeira de Eucalyptus grandis confeccionados em laboratório e em linha de produção industrial. **Ciência Florestal**, v. 20, p. 493-500, 2010.
- BENETTO, E.; BECKER, M.; WELFRING, J. Life cycle assessment of oriented strand boards (OSB): from process innovation to ecodesign. **Environmental Science & Technology**, v. 43, p. 6003-6009, 2009.
- BLOMSMA, F. Collective 'action recipes' in a circular economy—On waste and resource management frameworks and their role in collective change. **Journal of Cleaner Production**, v. 199, p. 969-982, 2018.
- BNDES SETORIAL. **Painéis de Madeira no Brasil: Panorama e Perspectivas**. 27. ed. Rio de Janeiro, 2008. p. 49-90. Disponível em: <http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/export/sites/default/bndes_pt/Galerias/Arquivos/conhecimento/bnset/set2706.pdf>. Acesso em: 21 set. 2018.

BNDES SETORIAL. **Panorama de mercado: painéis de madeira**. 40. ed. 2013.p. 323-384. Disponível em: <https://docplayer.com.br/13051949-Panorama-de-mercado-paineis-de-madeira-andre-carvalho-foster-vidal-andre-barros-da-hora.html>>. Acesso em: 21 set.2018

BERGMAN, R.; KAESTNER, D.; TAYLOR, A.M. Life cycle impacts of north american wood panel manufacturing. **Wood and Fiber Science**, v. 48, p.40-53, 2015.

BOM, R.P. **Cadeira de painéis de madeira**: Processo produtivo de painéis de madeira. 2008. Disponível em: <<https://docplayer.com.br/9499347-Processo-produtivo-de-paineis-mdf.html>>. Acesso em: 02 ago. 2018.

BRESSANELLI, G.; ADRODEGARI, F.; PERONA, M.; SACCANI, N. Exploring how usage-focused business models enable circular economy through digital technologies. **Sustainability**, v. 10, p. 639, 2018.

BS (The British Standard Institution). **BS 8001**. - Framework for implementing the principles of the circular economy in organizations: Guide, 2017.

CAMBRIA, D.; PIERANGELI, D. Application of a life cycle assessment to walnut tree (*Juglans regia* L.) high quality wood production: a case study in southern Italy. **Journal of Cleaner Production**, v. 23, p. 37-46, 2012.

CAMPOS, C.I. **MDF- Processo de produção, propriedades e aplicações**. 2002. Disponível em: <https://www.ipen.br/biblioteca/cd/cbecimat/2002/arqs_pdf/pdf_200/tc206-028.pdf>. Acesso em: 25 fev. 2019.

CAMPOS, C. I. **Propriedades físico-mecânicas de MDF produzido com fibras de madeira de reflorestamento e adesivos alternativos em diferentes teores**. São Carlos-SP, 2005, 113 p. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Departamento de Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade de São Paulo, 2005.

CHANG, H.; TU, K.; WANG, X.; LIU, J. Fabrication of mechanically durable superhydrophobic wood surfaces using polydimethylsiloxane and silica nanoparticles. **RSC Advances**, v. 5, n. 39, p. 30647-30653, 2015.

CEO GUIDE to the Circular Bioeconomy. 2019. Disponível em: <https://www.wbcasd.org/Programs/Circular-Economy/Factor-10/Resources/CEO-Guide-to-the-Circular-Bioeconomy>. Acesso em: 26 mar. 2020.

CEO GUIDE to the Circular Economy. Disponível em: https://cebds.org/wp-content/uploads/2017/06/CEO_Guide_to_CE.pdf. Acesso em: 26 mar. 2020.

CHIPANSKI, E. R. **Proposição para melhoria do desempenho ambiental da indústria de aglomerado no Brasil**. 2006. 190p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestal) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.

CHOTIKHUN, A.; HIZIROGLU, S. Some properties of composite panels manufactured from Eastern Redcedar (*Juniperus virginiana* L.) using modified starch as a green binder. **Journal of Natural Fibers**, v. 14, p. 541-550, 2017.

CHOW, S. **Quality control in veneer drying and plywood gluing**. 1973.

CSA (Canadian Standards Association). **OSB and waferboard**. 0437.0- 93. Ontario: 1993. 18p.

CONNER, A.H. Urea-formaldehyde adhesive resins. **Polymeric materials encyclopedia**, v. 11, p. 8496–501, 1996.

CZARNECKI, R.; DZIURCA, D.; LECKA, J. (2003). The use of recycled boards as the substitute for particleboard in the centre layer of particleboards. *Electronic Journal of Polish Agricultural Universities, Wood Technology*, v. 6, n.2, 2003. Disponível em: Acesso em: 23 Jun. 2014.

de Magalhães, M. A.; Vital, B. R; Carneiro, A. D. C. O.; da Silva, C. M. S.; de Freitas Filho, L.; Figueiró, C. G.; Ferreira, J. C. Adição de lignina Kraft à resina fenólica para a fabricação de compensados. **Revista Ciência da Madeira** (Brazilian Journal of Wood Science), v.10, 2019.

EMF- Ellen MacArthur Foundation. **Para uma Circular Economy-Economic and Business Fundamentação para uma transição acelerada**. Ellen MacArthur Foundation: Cowes, Reino Unido, 2013.

EMF- Ellen MacArthur Foundation. **Rumo a uma Economia Circular: Justificativa de Negócios para uma transição acelerada**. Ellen MacArthur Foundation: Cowes, Reino Unido, 2015.

EMF- Ellen MacArthur Foundation. **Uma Economia Circular no Brasil: Uma Abordagem exploratória inicial**. Ellen MacArthur Foundation: Cowes, Reino Unido, 2017.

EMF- Ellen MacArthur Foundation. **O que é uma economia circular?** Disponível:<https://www.ellenmacarthurfoundation.org/circular-economy/concept>. Acesso em 18 de nov. 2018.

ENSSLIN, L.; ENSSLIN, S. **Orientações para elaboração dos artigos científicos do LabMCDA-C** [Apostila da disciplina Avaliação de Desempenho do Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Santa Catarina]. Florianópolis. UFSC, 2007.

ENSSLIN, L., ENSSLIN, S.R., De MORAES P. H. Processo de investigação e Análise bibliométrica: Avaliação da Qualidade dos Serviços Bancários. **RAC-Revista de Administração Contemporânea**, v. 17, p. 325-349, 2013.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **European Standard EN 300** - Oriented Strand Boards (OSB): definitions, classification and specifications. Brussels, 2002.

FAOSTAT- **Food and Agriculture Organization of the United Nations**. Disponível em: <http://www.fao.org/faostat/en/#data/FO/visualize>. Acesso em: 18 de out. 2019.

FERREIRA, J. C.; MACHADO, J. R. Infra-estruturas verdes para um futuro urbano sustentável. O contributo da estrutura ecológica e dos corredores verdes. **Revista LabVerde**, p. 69-90, 2010.

FERRO, F.S.; SILVA, D.A.L.; LAHR, F.A.R.; ARGENTON, M.; GONZÁLES-GARCÍA, S. Environmental aspects of oriented strand boards production. A Brazilian case study. **Journal of Cleaner Production**, v. 183, p.710-719, 2018.

FGV Energia- **Gás Natural**. 2014. Disponível em: <<http://bibliotecadigital.fgv.br/dspace/bitstream/handle/10438/13850/energia2%20%281%29.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em: 05 nov. 2019.

FIKSEL, J.; LAL, R. Transforming waste into resources for the Indian economy. **Environmental Development**, v.26, p.123-128, 2018.

FRIHART, C. R. Wood adhesives: vital for producing most wood products. **Forest products journal**, v. 61, p. 4-12, 2011.

GAITONDE, V. N.; KARNIK, S. R.; DAVIM, J. P. Prediction and minimization of delamination in drilling of medium-density fiberboard (MDF) using response surface methodology and Taguchi design. **Materials and Manufacturing Processes**, v. 23, p.377-384, 2008.

GARZA-REYES, J. A.; PARKAR, H. S.; ORAIFIGE, I.; SORIANO-MEIER, H.; HARMANTO, D. An empirical-exploratory study of the status of lean manufacturing in India. **International Journal of Business Excellence**, v. 5(4), p. 395-412, 2012.

GAO, W.; DU, G.; KAMDEM, D. P. Influence of ammonium pentaborate (APB) on the performance of urea formaldehyde (UF) adhesives for plywood. **The Journal of Adhesion**, v. 91, p.186-196, 2015.

GEISSDOERFER, M.; SAVAGET, P.; BOCKEN, N.M.P.; JAN, E. The Circular Economy-A new sustainability paradigm? **Journal of Cleaner Production**, v.143, p. 757–768, 2017.

GHISELLINI, P.; CIALANI, C.; ULGIATI, S. A review on circular economy: The expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems. **Journal of Cleaner Production**, v.114, p.11–32, 2016.

GOLDEMBERG, J.; COELHO, S.T; GUARDABASSI P. The sustainability of ethanol production from sugarcane. **Energy Policy**, v.36, p. 2086–97, 2008.

GONZÁLES-GARCÍA, S.; FEIJOO, G.; WIDSTEN, P.; KANDELBAUER, A.; ZIKULNING-RUSCH, E.; MOREIRA, T.M. Environmental performance assessment of hardboard manufacture. **International Journal Life Cycle Assessment**, v.14, p.456-466, 2009.

GUIMARÃES, I.L. **Aproveitamento de Resíduo de Soja para Produção de Painéis MDP (*Medium Density Particleboard*)**. 2017.40f. Dissertação (Mestrado)-Curso de Agronomia .Universidade federal de Goiás Regional Jataí.

HELLMEISTER, V. **Painel OSB de resíduo de madeira Balsa (*Ochroma Pyramidale*)**. 2017. 145 f. Tese (Doutorado) - Curso de Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, Desenvolvimento, Caracterização e Aplicação de Materiais Voltados à Agroindústria, USP, Pirassununga, 2017.

HERCZEG, G.; AKKERMAN, R.; HAUSCHILD, M. Z. Supply chain collaboration in industrial symbiosis networks. **Journal of Cleaner Production**, v. 171, p. 1058-1067, 2018.

HUANG, J.; LI, K. A new soy flour-based adhesive for making interior type II plywood. **Journal of the American Oil Chemists' Society**, v.85, p. 63-70.

IBÁ. **RELATÓRIO 2017**. Disponível em: <https://iba.org/images/shared/Biblioteca/IBA_RelatorioAnual2017.pdf>. Acesso em: 07 out. 2018.

IRITANI, D.R.; SILVA, D.A.L.; SAAVEDRA, Y.M.B.; GRAEL, P.F.F.; OMETTO, A.R. Sustainable strategies analysis through Life Cycle Assessment: a case study in a furniture industry. **Journal of Cleaner Production**, v. 96, p. 308-3018, 2015.

IRLE, M. A.; BARBU, M. C.; REH, R.; BERGLAND, L.; ROWELL, R. M. **Wood Composites**. In: ROWELL, R. M. Handbook of wood chemistry and wood composites. Boca Raton: CRC Press, 2012. Cap. 10

ISO (International organization for standardization). **ISO 14040**. Environmental Management –Life Cycle Assessment – Principles and Framework. Geneva (Switzerland): European Standard, 2006a.

IWAKIRI, S. **Painéis de aglomerado de madeira** [S. Painéis de madeira reconstituída]. FUPEF: Curitiba, Brasil, 2005, pp 247.

IWAKIRI, S.; MENDES, L. M.; SALDANHA, L. K. Produção de chapas de partículas orientadas “OSB” de *Eucalyptus grandis* com diferentes teores de resina, parafina e composição em camadas. **Ciência Florestal**, v. 13, p.89-94, 2003.

JAIN, S.; JAIN, N.K.; AND METRI, B. “Strategic framework towards measuring a circular supply chain management”, **Benchmarking: An International Journal**, v. 25, p. 3238-3252, 2018.

JANG, Y.; HUANG, J.; LI, K. A new formaldehyde-free wood adhesive from renewable materials. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, v. 31, n. 7, p. 754-759, 2011.

KHAN, I. U.; OTHMAN, M. H. D.; HASHIM, H., MATSUURA, T.; ISMAIL, A. F.; REZAEI-DASHTARZHANDI, M.; AZELEE, I. W. Biogas as a renewable energy fuel– A review of biogas upgrading, utilisation and storage. **Energy Conversion and Management**, v.150, p. 277-294, 2017.

KIM, T. Production Planning to Reduce Production Cost and Formaldehyde Emission in Furniture Production Process Using Medium-Density Fiberboard. **Processes**, v.7, p.529, 2019.

KIRCHHERR, J.; REIKE, D.; HEKKERT, M. Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. **Resources, Conservation and Recycling**, v.127, p. 221-232, 2017.

KOUCHAKI-PENCHAH, H.; SHARIFI, M.; MOUSAZADEH, H.; ZAREA-HOSSEINABADI, H.; NABAVI-PELESARAEI, A. Gate to gate life cycle assessment of flat pressed particleboard production in Islamic Republic of Iran. **Journal of Cleaner Production**, v. 112, p. 343-350, 2016.

KOUCHAKI-PENCHAH, H.; SHARIFI, M.; MOUSAZADEH, H.; ZAREA-HOSSEINABADI, H. Life cycle assessment of medium-density fiberboard manufacturing process in Islamic Republic of Iran. **Journal of Cleaner Production**, v. 112, p.351-358, 2016.

LEHMANN, S. Low carbon construction systems using prefabricated engineered solid wood panels for urban infill to significantly reduce greenhouse gas emissions. **Sustainable Cities and Society**, v.6, p.57-67, 2013.

LEHMANN, S. Sustainable construction for urban infill development using engineered massive wood panel systems. **Sustainability**, v.4, p. 2707-2742, 2012.

LEI, H.; DU, G.; PIZZI, A.; CELZARD, A. Influence of nanoclay on urea-formaldehyde resins for wood adhesives and its model. **Journal of Applied Polymer Science**, v.109, p. 2442–2451, 2008.

LEITE, P. R. Logística reversa de produtos não consumidos: práticas de empresas no Brasil. **Gestão. Org-Revista Eletrônica de Gestão Organizacional**, v.3, 2010.

LI, K.; GENG, X.; SIMONSEN, J.; KARCHESY, J. Novel wood adhesives from condensed tannins and polyethylenimine. **International journal of adhesion and adhesives**, v. 24, n. 4, p. 327-333, 2004.

LIN, Q.; YANG, G.; LIU J, RAO, J. Property of nano-SiO₂/urea formaldehyde resin. **Frontiers of Forest in China**, v. 2, p.230–237, 2006.

MALONEY, T. M. **Modern particleboard & dry-process fiberboard**. 2. ed. San Francisco: Miller Freeman, 1993. 681p.

MDIC - **Ministério de Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior**. Ficha Técnica. Disponível em: <http://www.mdic.gov.br/images/REPOSITARIO/sdci/Ficha-Tecnica-Divisoria-ONU.pdf>. Acesso em 18 de Dez. 2018.

Mirabella, N.; Castellani,V.; Sala, S. LCA for assessing environmental benefit of eco-design strategies and forest wood short supply chain: a furniture case study. **International Journal Life Cycle Assessment**, v. 19, p. 1536-1550, 2014.

MMA (Ministério do meio ambiente). **Uso Racional de Recursos**. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/responsabilidade-socioambiental/a3p/eixos-tematicos/uso-racional-do-recursos>>. Acesso em 10 de out. 2019.

MOSLEMI, A.A. **Particleboard**: v.1: materials. Southern Illinois University, 1974.

MOUBARIK, A.; MANSOURI, H. R.; PIZZI, A.; ALLAL, A.; CHARRIER, F.; BADIA, M. A.; CHARRIER, B. Evaluation of mechanical and physical properties of industrial particleboard bonded with a corn flour–urea formaldehyde adhesive. **Composites Part B: Engineering**, v. 44, p. 48-51, 2013.

NAKANO, K.; ANDO, K.; TAKIGAWA, M.; HATTORI, N. Life cycle assessment of wood-based boards produced in Japan and impact of formaldehyde emissions during the use stage. **International Journal Life Cycle Assessment**, v. 23, p. 957-969, 2018.

NASCIMENTO, M. F.; MORALES, E. A. M. Fabricação de painéis OSB com madeira proveniente de espécies de madeira da caatinga do nordeste brasileiro. **Lahr, FAR São Carlos: EESC/USP**, p. 119-136, 2008.

NOISEL, N.; BOUCHARD, M.; CARRIER, G. Evaluation of the health impact of lowering the formaldehyde occupational exposure limit for Quebec workers. **Regulatory Toxicology and Pharmacology**, v. 48, p.118–27, 2007.

OLAWUMI, T. O.; CHAN, D. W. A scientometric review of global research on sustainability and sustainable development. **Journal of cleaner production**, v. 183, p. 231-250, 2018.

PARIDA, V.; SJÖDIN, D.; REIM, W. Reviewing literature on digitalization, business model innovation, and sustainable industry: Past achievements and future promises, **Sustainability**, v.11, p. 391, 2019.

PETROBRAS. **Gás Natural**. Disponível em: <<http://www.petrobras.com.br/pt/produtos-e-servicos/produtos/industriais/gas-natural-industrial/>>. Acesso em: 05 nov. 2019.

PETROBRAS. **Óleo Diesel**. Disponível em: <<http://www.petrobras.com.br/pt/produtos-e-servicos/produtos/automotivos/oleo-diesel/>>. Acesso em: 05 nov. 2019.

PETROBRÁS. **Parafina**. Disponível em: <<http://www.petrobras.com.br/pt/produtos-e-servicos/produtos/industriais/parafina/>>. Acesso em: 05 nov. 2019

PETROBRAS. **Sulfato de amônio**. Disponível em: <<http://www.petrobras.com.br/pt/produtos-e-servicos/produtos/nitrogenados/sulfato-de-amonio-industrial/>>. Acesso em: 05 nov. 2019.

PIEKARSKI, C.M.; FRANCISCO, A.C.; LUZ, L.M.; KOVALESKI, J.L.; SILVA, D.A.L. Life cycle assessment of medium-density fiberboard (MDF) manufacturing process in Brazil. **Science of the Total Environment**, v. 575, p. 103–111, 2017.

PIEKARSKI, C. M. **Proposta de melhoria do desempenho ambiental associado ao ciclo de vida da produção do painel de madeira MDF**. 2013. 147 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2013.

PIZZI, A. Recent developments in eco-efficient bio-based adhesives for wood bonding: opportunities and issues. **Journal of adhesion science and technology**, v. 20, n. 8, p. 829-846, 2006.

PORTUGAL, G. **Recursos naturais**, 1992.

PROFILI, J.; LEVASSEUR, O.; KORONAI, A.; STAFFORD, L.; GHERARDI, N. Deposition of nanocomposite coatings on wood using cold discharges at atmospheric pressure. **Surface and Coatings Technology**, v. 309, p. 729-737, 2017.

RAMIREZ-CORETTI, A., ECKELMAN, C. A., & WOLFE, R. W. Inorganic-bonded composite wood panel systems for low-cost housing: a Central American perspective. **Forest Products Journal**, v. 48, p. 63, 1998.

RAJPUT, S.; SINGH, S. P. Industry 4.0– challenges to implement circular economy. **Benchmarking: An International Journal**, 2019.

REBOLLAR, M.; PÉREZ, R.; VIDAL, R. Comparison between oriented strand boards and other wood-based panels for the manufacture of furniture. **Materials & design**, v. 28, p. 882-888, 2007.

RIVELA, B.; MOREIRA, M.T.; FEIJOO, G. Life Cycle Inventory of Medium Density Fibreboard. **Wood and Other Renewable Resources**, v.12, p.143–150, 2007.

RODRIGUES, B. S. Geopolítica dos recursos naturais estratégicos sul-americanos no século XXI. Rio de Janeiro, Brasil: **UFRJ**, 146, 2015.

ROFFAEL, E.; DIX, B.; OKUM, J. Use of spruce tannin as a binder in particleboards and medium density fiberboards (MDF). **Holz als Roh-und Werkstoff**, v. 58, p. 0301-0305, 2000.

ROUMELI, E.; PAVLIDOU, E.; PAPADOPOULOU, E.; VOURLIAS, G.; BIKIARIS, D.; PARASKEVOPOULOS, K.M.; CHRISAFIS, K. Synthesis, characterization and thermal analysis of urea formaldehyde/nanoSiO₂ resins. **Thermochimica Acta**, v. 527, p.33–39, 2012.

SALARI, A.; TABARSA, T.; KHAZAEIAN, A.; SARAEIAN, A. Improving some of applied properties of oriented strand board (OSB) made from underutilized low quality paulownia wood employing nano-SiO₂. **Industrial Crops and Products**, v. 42, p.1-9, 2013.

SHAHABUDDIN, M.; LIAQUAT, A. M.; MASJUKI, H. H.; KALAM, M. A.; MOFIJUR, M. Ignition delay, combustion and emission characteristics of diesel engine fueled with biodiesel. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 21, p.623-632, 2013.

SHI, A.; DU, Z.; MA, X.; CHENG, Y.; MIN, M.; DENG, S.; RUAN, R. Production and evaluation of biodiesel and bioethanol from high oil corn using three processing routes. **Bioresource Technology**, v.128, p.100-106, 2013.

SILVA, D.A.L.; LAHR, F.A.R.; GARCIA, R.P.; FREIRE, F.M.C.S.; OMETTO, A.R. Life cycle assessment of médium density particleboard (MDP) produced in Brazil. **International Journal Life Cycle Assessment**, v. 18, p.1404–1411, 2013.

SILVA, D. A. L. **Avaliação do ciclo de vida da produção do painel de madeira MDP no Brasil**. 2012. 207 f. Dissertação (Mestrado) - Ciência e Engenharia de Materiais- Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

SILVA, G. C. **Qualidade de painéis aglomerados produzidos com adesivos à base de lignosulfonato e uréia-formaldeído**. 2015. 95 f. Tese (Doutorado) - Ciências Ambientais e Florestais - Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2015.

SILVA, T. DA; MATSUDA, C. K.; COELHO, T. M.; FILHO, N. A.; de MELLO CAMPOS, R. V.; DE ALMEIDA, D. M. Desenvolvimento e avaliação de painéis produzidos a partir de resíduos de serragem e soja. In: IX EPCC- Encontro Anual de Iniciação Científica da Unicesumar, 9., 2015, Maringá- PR. **Anais Eletrônico**. [s.1]

SILVEIRA, D. T.; CÓRDOVA, F.P. Unidade 2–A pesquisa científica. **Métodos de pesquisa**, v. 1, 2009.

SKAAR, C.; JØRGENSEN, R.B. Integrating human health impact from indoor emissions into an LCA: a case study evaluating the significance of the use stage. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 18, p. 636-646, 2013.

STARK, N. M.; CAI, Z.; CARLL, C. **Wood-Based Composite Materials: Panel Products, Glued-Laminated Timber, Structural Composite Lumber, and Wood–Nonwood Composite Materials**. In: FOREST PRODUCTS LABORATORY. Wood Handbook: wood as an engineering material. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 2010. Cap. 11.

SUOMALA, P. The life cycle dimension of new product development performance measurement. **International Journal of Innovation Management**, v. 08, p. 193-221, 2004.

TANG, X.; BAI, Y.; DUONG, A.; SMITH, M. T.; LI, L.; ZHANG, L. Formaldehyde in China: production, consumption, exposure levels, and health effects. **Environment international**, v. 35, p. 1210-1224, 2009.

TANKUT, A. N. Optimum dowel spacing for corner joints in 32-mm cabinet construction. **Forest Products Journal**, v.55, 2005.

THE BRITISH STANDARD INSTITUTIO). **BS 8001:2017** - Framework for implementing the principles of the circular economy in organizations: Guide, 2017.

THOEMEN, H. Wood-Based Panels: **An Introduction for Specialists**; **Brunel University Press**: London, UK, 2010.

TU, K.; KONG, L.; WANG, X.; LIU, J. Semitransparent, durable superhydrophobic polydimethylsiloxane/SiO₂ nanocomposite coatings on varnished wood. **Holzforschung**, v. 70, n. 11, p. 1039-1045, 2016.

UPTON, B. M.; KASKO, A.M. Strategies for the conversion of lignin to high-value polymeric materials: review and perspective. **Chemical reviews**, v. 116, n. 4, p. 2275-2306, 2016.

VAN BUREN, N.; DEMMERS, M.; VAN DER HEIJDEN, R.; WITLOX, F. Towards a circular economy: The role of Dutch logistics industries and governments. **Sustainability**, v.8, p. 647, 2016.

VAN DAM, J.E; VAN DEN OEVER, M.J.; TEUNISSEN, W.; KEIJERS, E.R.; PERALTA, A.G. Process for production of high density/high performance binderless boards from whole coconut husk. **Industrial Crops and Products**, v.19, p.207–16, 2004.

WANG, X.; CHAI, Y.; LIU, J. Formation of highly hydrophobic wood surfaces using silica nanoparticles modified with long-chain alkylsilane. **Holzforschung**, v. 67, n. 6, p. 667-672, 2013.

ZACHO, K.O.; MOSGAARD, M.; RIISGAARD, H. Capturing Uncaptured Values-A Danish case study on municipal preparation for reuse and recycling of waste. **Resource Conservation and Recycling**, v. 136, p. 297–305, 2018.

ZHAO, Z.; UMEMURA, K. Investigation of a new natural particleboard adhesive composed of tannin and sucrose. **Journal of wood science**, v.60, n.4, p. 269-277, 2014.