UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
FACULDADE DE ZOOTECNIA E ENGENHARIA DE ALIMENTOS

LETÍCIA MISSIATTO GAVIOLI

**Avaliação de ciclo de vida como estratégia ambiental para
desenvolvimento de painéis de partículas com subprodutos
agroindustriais**

LETÍCIA MISSIATTO GAVIOLI

**Avaliação de Ciclo de Vida como estratégia ambiental para
desenvolvimento de painéis de partículas com subprodutos
agroindustriais**

VERSÃO CORRIGIDA

Dissertação apresentada à Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para a obtenção do Título de Mestre em Ciências do programa de pós-graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais.

Área de Concentração:
Desenvolvimento, Caracterização e
Aplicação de Materiais Voltados à
Agroindústria.

Orientador: Prof. Dr. João Adriano
Rossignolo
Coorientadora: Prof. Dr^a. Cristiane
Bueno

Ficha catalográfica elaborada pelo
Serviço de Biblioteca e Informação, FZEA/USP,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

G283a Gavioli, Leticia Missiatto
Avaliação de Ciclo de Vida como estratégia ambiental para desenvolvimento de painéis de partículas com subprodutos agroindustriais / Leticia Missiatto Gavioli ; orientador João Adriano Rossignolo ; coorientador Cristiane Bueno. -- Pirassununga, 2020.
99 f.

Dissertação (Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência de Materiais) -- Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, Universidade de São Paulo.

1. bagaço de cana-de-açúcar. 2. resina poliuretana à base de óleo de mamona. 3. painel de partículas de média densidade. 4. desempenho ambiental. I. Rossignolo, João Adriano , orient. II. Bueno, Cristiane, coorient. III. Título.

Aos meus pais, que me ensinaram o valor do estudo, o amor ao próximo e a nunca perder a fé em Deus.

Agradecimentos

Agradeço à Deus por estar comigo em todos os momentos e me dar forças para seguir em frente.

Aos meus pais Mauro e Renata, meus exemplos de vida, por serem meu suporte, sempre me apoiando e me guiando em minhas decisões e pelo amor que têm me dado há vinte e oito anos.

Às minhas irmãs Isabela e Gabriele por estarem sempre ao meu lado, por me mostrarem outros pontos de vista, me falarem a verdade sempre, pelo amor e por serem minhas melhores amigas.

Ao meu noivo Thiago, por todo o carinho, cuidado, amor durante esses dez anos, mas principalmente nessa fase da minha vida. Por todo o apoio até mesmo na conclusão do texto de dissertação.

Ao professor Dr. João Adriano Rossignolo pela orientação, amizade, ensinamentos e por toda a compreensão durante minha carreira acadêmica.

A professora Dr^a Cristiane Bueno pela orientação, ensinamentos, carinho e paciência ao desenvolvimento do meu estudo.

À Universidade de São Paulo e a Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos pela oportunidade.

Ao programa de Engenharia e Ciência de Materiais e ao Serviço de Pós-Graduação principalmente à Maria Cecília, Kefilin, Aline, Paula e Érica, por todo o suporte.

À Coordenadoria de Aperfeiçoamento Pessoal de Nivel Superior (CAPES) pelo financiamento.

Ao laboratório de Construções Rurais e Ambiente e a todos os meus amigos que estiveram comigo neste período Adriana, Alda, Camilo, Christian, Gonzalo, Maria Júlia, Marzieh, Patrícia, Rafael, Rachel e Zaqueu.

Aos técnicos Diego e Mariana pelo suporte e ao professor Sérgio Francisco Santos por ter me ensinado sobre a grandeza e a humildade de compartilhar o conhecimento.

RESUMO

GAVIOLI, L. M. **Avaliação de Ciclo de Vida como estratégia ambiental para desenvolvimento de painéis de partículas com subprodutos agroindustriais.** 2019. 107 f. Qualificação (Mestrado) – Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, Universidade de São Paulo, Pirassununga, 2019.

A produção de painel de partículas aumentou nas últimas décadas devido à necessidade de otimizar o uso de madeira e ao aumento da demanda na indústria moveleira. As principais matérias-primas para a fabricação de painéis de partículas são as madeiras de pinus e eucalipto e a resina de ureia formaldeído (UF). Como alternativa, estudos utilizam resíduos lignocelulósicos da agroindústria como bagaço de cana-de-açúcar (BCA) e resina poliuretana (PU) à base de óleo de mamona como matérias-primas, as quais possuem requisitos físicos e mecânicos que atendem aos padrões brasileiros e internacionais de função não estrutural e uso interno em condições secas. No entanto, os estudos de impactos ambientais dessa substituição são limitados. Dessa forma, este trabalho tem como objetivo avaliar os impactos ambientais de um painel de partículas de média densidade (MDP) fabricado com partículas de BCA e eucalipto e resina UF e PU de mamona através da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV). A avaliação do berço ao portão de 1 m³ de painel MDP foi realizada com cinco composições diferentes. O inventário considerou o banco de dados Ecoinvent 2.01 e SICV Brasil. Os potenciais impactos ambientais foram avaliados pelo *software* GaBi 6, método de Avaliação de Impacto de Ciclo de Vida (AICV) ReCiPe, incluindo 18 categorias de impacto em nível *midpoint*. Os resultados indicam que o principal impacto ambiental foi da produção da resina UF. O potencial de impacto da resina PU de mamona foi menor em 14 categorias quando comparado à resina UF. A produção de BCA teve maior impacto que o eucalipto para categorias de ecotoxicidade terrestre e em água doce, além de eutrofização de água doce. O eucalipto apresentou maior potencial de impacto para categorias de Ocupação de Solo Agrícola e Transformação de Solo Natural. O painel com melhor desempenho ambiental para oito categorias de impacto foi uma mistura de BCA e eucalipto com resina PU de óleo de mamona, com redução de até 80% no potencial de impacto comparado ao painel convencional. O painel de desempenho ambiental inferior foi o MDP convencional para 11 categorias. A identificação dos impactos ambientais pode auxiliar em melhorias dentro do sistema de produto e a ACV de diferentes matérias-primas pode ser usada como uma estratégia ambiental para matérias-primas.

Palavras-chave: Bagaço de cana-de-açúcar; resina poliuretana à base de óleo de mamona; painel de partículas de média densidade; desempenho ambiental.

ABSTRACT

GAVIOLI, L. M. **Life Cycle Assessment as an environmental strategy for the development of particleboards with agro industrial byproduct**. 2019. 107 f. Qualification M.Sc. Dissertation – Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, Universidade de São Paulo, Pirassununga, 2019.

Particle board production has increased in last few decades due to the need to optimize wood use and increasing demand in the furniture industry. The main raw materials for the manufacture of particle board are pine and eucalyptus woods and formaldehyde urea resin (UF). Alternatively, studies use lignocellulosic residues from agribusiness such as sugarcane bagasse (SB) and castor oil-based polyurethane resin (PU) as raw materials, which have physical and mechanical requirements that meet Brazilian and international standards to non-structural functions and internal use in dry conditions. However, the environmental impact studies of this substitution are limited. Thus, this work aims to evaluate the environmental impacts of a medium density particle board (MDP) manufactured with SB and eucalyptus particles and castor oil PU and UF resin through Life Cycle Assessment (LCA). The cradle to gate evaluation of 1 m³ MDP panel was performed with five different compositions. The inventory considered the database Ecoinvent 2.01 and SICV Brazil. Potential environmental impacts were assessed by the GaBi 6 software and ReCiPe Life Cycle Impact Assessment (LCIA) method, including 18 impact midpoint categories. The results indicate that the main environmental impact was the production of UF resin. The impact potential of castor oil PU resin was lower in 14 categories when compared to UF resin. The BCA production had higher impact than eucalyptus for Terrestrial and Freshwater Ecotoxicity categories, as well as Freshwater Eutrophication. Eucalyptus presented higher impact potential for Agricultural Soil Occupation and Natural Soil Transformation categories. The best performing environmental panel for eight impact categories was a blend of BCA and eucalyptus with castor oil PU resin, with a reduction of up to 80% of the impact potential to the conventional panel. The lower environmental performance panel was the conventional MDP to 11 categories. The hotspots identification can assist to improve the product system and the LCA of different raw materials could be used as an environmental strategy to choose eco-friendly inputs.

Keywords: sugarcane bagasse; castor oil-based polyurethane resin; medium density particleboard; environmental performance.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Camadas do painel MDP multicamadas no sentido da espessura	13
Figura 2 - Produção brasileira de painéis de madeira reconstituída em milhões (m ³) no ano de 2016	14
Figura 3 - Representação da formação de uma poliuretana.....	19
Figura 4 - Definições da Economia Circular	22
Figura 6 - Estrutura da ACV: principais fases.....	25
Figura 7 - Exemplo de um conjunto de processos elementares dentro de um sistema de produto	26
Figura 8 - Esquema de Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida.....	27
Figura 9 - Escopo geográfico do estudo	39
Figura 10 - Fronteiras referentes ao Painel 1	41
Figura 11 - Fronteiras referentes ao Painel 2.....	42
Figura 12 - Fronteiras referentes ao Painel 3.....	43
Figura 13 - Fronteiras referentes ao Painel 4.....	44
Figura 14 - Fronteiras referentes ao Painel 5.....	45
Figura 15 - Representação gráfica das formulações de MDP utilizadas no estudo.....	47
Figura 16 - a) Estufa com circulação de ar quente; b) Estufa com bagaço de cana-de-açúcar para secagem	48
Figura 17 - Jogo de peneiras vibratórias utilizadas para seleção de partículas	49
Figura 18 - Partículas de bagaço de cana-de-açúcar e eucalipto misturadas	50
Figura 19 - Corpo de prova após ensaio de resistência à tração perpendicular	53
Figura 20 - a) Máquina universal de ensaios mecânicos preparada para ensaio de resistência à flexão estática; b) Ruptura dos corpos de prova após o ensaio de resistência à flexão estática	55
Figura 21 - Principais matérias-primas de cada painel de partículas estudado	61
Figura 22 - Análise de contribuição de impactos para a categoria MC.....	64
Figura 23 - Análise de contribuição de impactos para a categoria ERF.....	65
Figura 24 - Análise de contribuição de impactos para a categoria TH.....	66
Figura 25 - Análise de contribuição de impactos para a categoria RI.....	67
Figura 26 - Análise de contribuição de impactos para a categoria DM	68
Figura 27 - Análise de contribuição de impactos para a categoria DO	69
Figura 28 - Análise de contribuição de impactos para a categoria FP	70
Figura 29 - Análise de contribuição de impactos para a categoria FOQ.....	71

Figura 30 - Análise de contribuição de impactos para a categoria OSA	72
Figura 31 - Análise de contribuição de impactos para a categoria TSN	73
Figura 32 - Análise de contribuição de impactos para a categoria OSU	74
Figura 33 - Análise de contribuição de impactos para a categoria AT.....	74
Figura 34 - Análise de contribuição de impactos para a categoria ET.....	75
Figura 35 - Análise de contribuição de impactos para a categoria ECAD	76
Figura 36 - Análise de contribuição de impactos para a categoria EAD.....	77
Figura 37 - Análise de contribuição de impactos para a categoria ECM	78
Figura 38 - Análise de contribuição de impactos para a categoria EM.....	79
Figura 39 - Análise de contribuição de impactos para a categoria.....	80

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação de painéis de partícula de média densidade	12
Tabela 2 - Princípio e aspectos gerais da sustentabilidade.....	23
Tabela 3 – Conteúdo do objetivo de uma ACV.....	25
Tabela 4 - Principais metodologias de AICV	28
Tabela 5 - Revisão bibliográfica sobre aplicação da ACV em painéis MDP.....	30
Tabela 6 - Oferta interna de energia elétrica por fonte ano base 2018.....	40
Tabela 7 - Requisitos para painéis não estruturais de uso interno em condições secas	46
Tabela 8 - Painéis utilizados na ACV.....	47
Tabela 9 - Propriedades físicas referentes aos painéis 2 e 4.....	58
Tabela 10 - Propriedades mecânicas referentes aos painéis 2 e 4	59
Tabela 11 - Resultados da AICV em nível <i>midpoint</i> pela metodologia ReCiPe 2008.....	60
Tabela 12 - Valores de contribuição de impacto referentes à categoria Mudanças Climáticas (MC)	93
Tabela 13 - Valores de contribuição de impacto referentes à categoria Esgotamento de Recursos Fósseis (ERF)	93
Tabela 14 - Valores de contribuição de impacto referentes à categoria Toxicidade Humana (TH)	93
Tabela 15 - Valores de contribuição de impacto referentes à categoria Radiação Ionizante (RI)	94
Tabela 16 - Valores de contribuição de impacto referentes à categoria Depleção de Metais (DM)	94
Tabela 17 - Valores de contribuição de impacto referentes à categoria Depleção de Ozônio (DO)	94
Tabela 18 - Valores de contribuição de impacto referentes à categoria Formação de Partículas (FP).....	95
Tabela 19 - Valores de contribuição de impacto referentes à categoria Formação de Oxidantes Químicos (FOQ).....	95
Tabela 20 - Valores de contribuição de impacto referentes à categoria Ocupação de Solo Agrícola (OSA)	95
Tabela 21 - Valores de contribuição de impacto referentes à categoria Transformação de Solo Natural (TSN).....	96
Tabela 22 - Valores de contribuição de impacto referentes à categoria Ocupação de Solo Urbano (OSU)	96

Tabela 23 - Valores de contribuição de impacto referentes à categoria Acidificação Terrestre (AT)	96
Tabela 24 - Valores de contribuição de impacto referentes à categoria Ecotoxicidade Terrestre (ET).....	97
Tabela 25 - Valores de contribuição de impacto referentes à categoria Ecotoxicidade em Água Doce (ECAD)	97
Tabela 26 - Valores de contribuição de impacto referentes à categoria Eutrofização em Água Doce (EAD).....	97
Tabela 27 - Valores de contribuição de impacto referentes à categoria Ecotoxicidade Marinha (ECM).....	98
Tabela 28 - Valores de contribuição de impacto referentes à categoria Eutrofização Marinha (EM)	98
Tabela 29 - Valores de contribuição de impacto referentes à categoria Esgotamento de Água (EA)	98

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ACV – Avaliação de Ciclo de Vida

AICV – Avaliação de Impacto de Ciclo de Vida

ANSI – Instituto Americano de Padronização Nacional

AT – Acidificação Terrestre

BCA – Bagaço de Cana-de-açúcar

CI – Categoria de Impacto

CO₂ – Dióxido de Carbono

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento

DM – Depleção de Metais

DO – Depleção de Ozônio

EA – Esgotamento de Água

EAD – Eutrofização em Água Doce

EC – Economia Circular

ECAD – Ecotoxicidade em Água Doce

ECM – Ecotoxicidade Marinha

EEA – Empresa de Engenharia Ambiental

EM – European Standards

EM – Eutrofização Marinha

ERF – Esgotamento de Recursos Fósseis

ET – Ecotoxicidade Terrestre

FAO – Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura

FF – Fenol Formaldeído

FOQ – Formação de Oxidantes Químicos

FP – Formação de Partículas

GEE – Gases de Efeito Estufa

GQATP – Grupo de Química Analítica de Polímeros

HB – Chapas de fibras

HDP – Fibras de Alta Densidade

IAC – Instituto Agrônomo de Campinas

IBA – Instituto Brasileiro de Atuária

IBICT – Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia

ICV – Inventário de Ciclo de Vida

ILCD – Referência Internacional de Dados de Ciclo de Vida

IQSC – Instituto de Química de São Carlos

ISO – Organização Internacional de Normalização

MC – Mudanças Climáticas

MDF – Fibras de média densidade

MDP – Painéis de partículas de média densidade

NBR – Normas brasileiras

OSA – Ocupação de Solo Agrícola

OSU – Ocupação de Solo Urbano

PIB – Produto interno bruto

PU – Poliuretano

RI – Radiação Ionizante

SDF – Fibras de super densidade

TH – Toxicidade Humana

TSN – Transformação de Solo Natural

UF – Ureia formaldeído

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	8
2. OBJETIVO GERAL	11
2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	11
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	11
3.1 PAINÉIS DE PARTÍCULAS DE MÉDIA DENSIDADE.....	11
3.1.1 BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR	15
3.1.2 RESINA POLIURETANA DE MAMONA	17
3.2 PAINÉIS MDP COM BCA E RESINA PU DE MAMONA	19
3.3 AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA E ECONOMIA CIRCULAR.....	21
3.3.1 APLICAÇÕES DE ACV EM PAINÉIS MDP	29
4. METODOLOGIA.....	33
4.1 DEFINIÇÕES DA METODOLOGIA DE ACV	34
4.1.1 DEFINIÇÃO DE OBJETIVO	34
4.1.2 ESCOPO	37
4.2 DEFINIÇÃO DE ESTUDOS JÁ EXISTENTES DE PAINÉIS MDP	45
4.3 PRODUÇÃO DE PAINÉIS MDP	48
4.3.1 DENSIDADE APARENTE (ABNT, 2018)	50
4.3.2 INCHAMENTO 24h (ABNT, 2018)	51
4.3.3 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO PERPENDICULAR (ABNT, 2018).....	52
4.3.4 RESISTÊNCIA À FLEXÃO ESTÁTICA E MÓDULO DE ELASTICIDADE (ABNT, 2018).....	54
4.1 ACV COMPARATIVA.....	56
4.2 INTERPRETAÇÃO, DISCUSSÃO E CONCLUSÕES DO ESTUDO	57
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	58
5.1 PROPRIEDADES FÍSICAS DOS PAINÉIS 2 E 4	58
5.2 PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS PAINÉIS 2 E 4.....	58

5.3	ACV COMPARATIVA.....	59
5.3.1	MUDANÇAS CLIMÁTICAS (MC)	63
5.3.2	ESGOTAMENTO DE RECURSOS FÓSSEIS (ERF).....	64
5.3.3	TOXICIDADE HUMANA (TH).....	65
5.3.4	RADIAÇÃO IONIZANTE (RI)	66
5.3.5	DEPLEÇÃO DE METAIS (DM)	67
5.3.6	DEPLEÇÃO DE OZÔNIO (DO)	68
5.3.7	FORMAÇÃO DE PARTÍCULAS (FP).....	69
5.3.8	FORMAÇÃO DE OXIDANTES QUÍMICOS (FOQ)	70
5.3.9	OCUPAÇÃO DE SOLO AGRÍCOLA (OSA)	71
5.3.10	TRANSFORMAÇÃO DE SOLO NATURAL (TSN)	72
5.3.11	OCUPAÇÃO DE SOLO URBANO (OSU)	73
5.3.12	ACIDIFICAÇÃO TERRESTRE (AT)	74
5.3.13	ECOTOXICIDADE TERRESTRE (ET).....	75
5.3.14	ECOTOXICIDADE EM ÁGUA DOCE (ECAD).....	76
5.3.15	EUTROFIZAÇÃO EM ÁGUA DOCE (EAD)	77
5.3.16	ECOTOXICIDADE MARINHA (ECM)	78
5.3.17	EUTROFIZAÇÃO MARINHA (EM).....	78
5.3.18	ESGOTAMENTO DE ÁGUA (EA)	79
5.3.19	CONSIDERAÇÕES FINAIS	80
6.	CONCLUSÕES	83
7.	BIBLIOGRAFIA	84
APÊNDICE A – VALORES DAS ANÁLISES DE CONTRIBUIÇÃO DE IMPACTO REFERENTE ÀS CATEGORIA DE IMPACTO <i>MIDPOINT</i> DA METODOLOGIA ReCiPe		
93		
ANEXO A – MIX ENERGÉTICO UTILIZADO		99

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, o campo da ciência dos materiais vem se concentrando cada vez mais na produção de materiais com menores impactos ambientais, com o objetivo de minimizar o consumo de recursos e a liberação de poluentes e de maximizar o reaproveitamento de resíduos (BATTEGAZZORE et al., 2017).

Segundo Kizinievič et al. (2018), os principais fatores que influenciam a crescente popularidade dos materiais de construção ambientalmente corretos são principalmente o surgimento de novos regulamentos ambientais, a urgência na redução de impactos ao meio ambiente, a necessidade de melhoria na saúde humana e a utilização de materiais no final de seu ciclo de vida, como uma forma de dar destino à resíduos e coprodutos.

O descarte de resíduos sólidos gerados a partir da produção agrícola e industrial representa uma área de preocupação recente, devido ao crescimento do volume de resíduos, relacionados ao crescimento da população, urbanização e aumento no consumo (BATTEGAZZORE et al., 2017).

Convencionalmente, a maioria das matérias-primas utilizadas na indústria de painéis particulados de média densidade (MDP) são partículas de madeira, porém devido à pressão sobre as florestas de crescimento lento, muitos estudos estão sendo realizados buscando avaliar novas matérias-primas ambientalmente corretas para a fabricação de painéis (NAKANISHI et al., 2018).

Segundo Nakanishi et al. (2018), resíduos agroindustriais têm apresentado notável potencial como matéria-prima para painéis de partículas, visto que a composição química destes resíduos é similar à composição da madeira.

Estudos sobre resíduos de soja (MARTINS et al., 2018), resíduos de açaí (MESQUITA et al., 2018), casca de amendoim (CRAVO et al., 2015), casca de arroz (CIANNAMEA et al., 2017), fibra de coco e casca de banana (WANG e HU, 2016) e, principalmente com bagaço de cana-de-açúcar (BCA) (OLIVEIRA et al., 2017; SILVA et al., 2018), estão sendo realizados recentemente e comprovam tecnicamente a utilização destes em painéis de partículas.

Mendes et al. (2014) estudaram os painéis alternativos de bagaço de cana-de-açúcar (BCA) em comparação aos painéis convencionais de pinus e eucalipto. Os painéis de BCA apresentaram propriedades físicas e mecânicas suficientes para atender às normas americana

ANSI A.208.1 (ANSI, 1993) e europeia EN 312 (EN, 1993) para painéis de partículas, garantindo sua utilização para os mesmos fins que os painéis convencionais.

Barrero et al. (2016) concluíram em seu estudo que os painéis de bagaço de cana-de-açúcar apresentam os mesmos efeitos de envelhecimento acelerado e envelhecimento natural dos painéis MDP convencionais, indicando também a possibilidade de aplicação dos painéis alternativos.

Além da utilização de resíduos para fabricação de painéis de partículas, segundo Fiorelli et al. (2013), algumas pesquisas buscam resinas alternativas às convencionais ureia formaldeído (UF) e fenol formaldeído (FF), devido a toxicidades das mesmas.

Segundo Fiorelli et al. (2013) há uma tendência mundial para produtos biodegradáveis, não poluentes e renováveis e, nesse sentido, pesquisas encontraram um adesivo baseado no óleo de mamona, apresentando como uma de suas vantagens menor temperatura de processamento e assim, menor consumo de energia na produção dos painéis de partículas.

Estudos sobre a fabricação de painéis com uso da resina poliuretana à base de óleo de mamona (PU de mamona) foram realizados e comprovam sua aplicabilidade em painéis de partículas com BCA. Eles apresentaram propriedades físicas e mecânicas similares aos painéis convencionais de madeira, sejam eles em multicamadas com baixa e média densidade (BUENO, 2015), em painéis homogêneos com alta densidade (SARTORI, 2015) e com adição de outras partículas e fibras (SILVA et al., 2018).

Tendo em vista os benefícios do uso do bagaço de cana-de-açúcar e da resina PU de mamona, pesquisas indicam que os painéis que utilizam a combinação dessas matérias-primas, produzem menores impactos ambientais do que os convencionais ou que são um passo a mais na direção de materiais construtivos sustentáveis (BATTISTELLE et al., 2016; SILVA et al., 2015).

Entretanto, segundo Santos et al. (2014), antes de esses produtos serem chamados de “sustentáveis” é essencial entender todas as consequências envolvidas e os reais ganhos para o meio ambiente e para o setor em questão. Uma maneira de quantificar consistentemente o aspecto ambiental para avaliar ou comparar um ou mais sistema de produto ou serviço é aplicar uma Avaliação de Ciclo de Vida (ACV).

A ACV é uma técnica de gestão ambiental pautada nas normas brasileiras NBR14040 (ABNT, 2009a) e NBR 14044 (ABNT, 2009b) e enfoca os aspectos ambientais e impactos potenciais ao longo de todo o ciclo de vida de um produto, desde a aquisição de matérias-primas, produção, uso, tratamento pós-uso, reciclagem até a disposição final (ABNT, 2009a).

Os resultados de uma ACV podem indicar qual processo do sistema produtivo apresenta os maiores impactos ambientais potenciais ou nos casos de ACV comparativa, pode-se apontar qual produto ou serviço apresenta maiores influências ao meio ambiente. Segundo a NBR 14044 (ABNT, 2009b), a aplicação da ACV pode ainda identificar oportunidades de melhorias e subsidiar níveis de informações de tomadores de decisão na indústria.

Silva (2012) aplicou a ACV no sistema de produção de painéis MDP convencionais, de madeira de eucalipto e resina ureia formaldeído (UF). Seus resultados indicam que a resina UF apresentou um dos maiores impactos ambientais em relação à toxicidade humana.

Silva et al. (2014a) estudaram a ACV em painel de bagaço de cana-de-açúcar (BCA) e, tendo em consideração dois estudos anteriores (OMETTO, HAUSCHILD e ROMA, 2009; SILVA et al., 2013), concluem que o painel alternativo ao MDP convencional pode substituí-lo, devido a sua melhor performance ambiental.

Entretanto, no estudo de Silva et al. (2014a), apesar do painel alternativo apresentar melhor performance ambiental, a produção do BCA apresentou impacto ambiental relevante referente à categoria de eutrofização potencial, principalmente devido à quantidade de químicos aplicados e as atividades de colheita da cana-de-açúcar.

Um estudo de ACV comparativa entre um painel de partículas de bagaço de cana-de-açúcar e outro de aparas de madeira de pinus, ambos utilizando a resina UF, foi realizado por Santos et al. (2014). Este estudo concluiu que o painel de bagaço de cana apresentou menores impactos ambientais potenciais em comparação ao painel convencional, e que o maior impacto foi referente ao uso da resina UF, sugerindo novos estudos com outros adesivos para comparação.

Não foram encontrados estudos de ACV em painéis MDP utilizando como adesivo a resina PU de mamona. Dessa forma, este estudo busca comparar os impactos ambientais potenciais de partículas de BCA e adesivo de PU de mamona em relação às matérias-primas

convencionais, para produção de painéis MDP por meio da ACV, a fim de atuar como uma estratégia ambiental na escolha de matérias-primas.

2. OBJETIVO GERAL

Identificar as possíveis formulações de painéis de partículas de média densidade (MDP) que apresentem melhor desempenho ambiental, com utilização de bagaço de cana-de-açúcar, eucalipto, resina poliuretana à base de óleo de mamona e resina ureia formaldeído, através de um estudo comparativo de ACV atribucional.

2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

A partir do objetivo geral desde trabalho, definiram-se alguns objetivos específicos com o propósito de maior organização na pesquisa e na posterior discussão de resultados:

- Avaliar e comparar a contribuição do uso de madeira de eucalipto e bagaço de cana-de-açúcar na confecção de painéis de partículas para o potencial de impacto do sistema de produção dos painéis;
- Avaliar e comparar a contribuição da resina ureia-formaldeído (UF) e resina poliuretana de mamona (PU de mamona) na fabricação dos painéis de partículas para o potencial de impacto do sistema de produção dos painéis;
- Identificar dentre as formulações apresentadas neste estudo, a formulação com melhor e menor desempenho ambiental, através de uma comparação de potenciais de impacto.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 PAINÉIS DE PARTÍCULAS DE MÉDIA DENSIDADE

O painel de partículas de média densidade, segundo a norma brasileira ABNT NBR 14810 (2013a), é um painel com densidade entre 551 kg/m³ e 750 kg/m³, constituído de partículas de madeira aglutinadas com resina termofixa, que se consolidam sob a ação conjunta de calor e pressão.

A norma ABNT NBR 14810 (2013a) classifica os painéis de partículas de média densidade em seis tipos, como pode ser observado na Tabela 1. Para cada classificação, a norma apresenta tabelas contendo os requisitos mínimos que o painel deve satisfazer para atender à norma e neste estudo, serão comparados painéis com a nomenclatura P2, painéis não estruturais para uso interno em condições secas.

Tabela 1 - Classificação de painéis de partícula de média densidade

Nomenclatura	Classificação
P2	Painéis não estruturais para uso interno em condições secas
P3	Painéis não estruturais para uso em condições úmidas
P4	Painéis não 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 não estruturais para uso em condições severas de carga, em condições úmidas

Fonte: Adaptado de ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT, Rio de Janeiro. **NBR 14810**. Painéis de partículas de média densidade. Parte 1: Terminologia. Rio de Janeiro, 2013a.

Segundo BIAZUS, HORA e LEITE (2010) os painéis de madeira podem ser divididos em painéis de madeira reconstituída e painéis de madeira processada mecanicamente. Os autores citam que entre os painéis de madeira reconstituída encontram-se o MDP (*medium density particleboard*), o MDF (*medium density fiberboard*) e correlatos como o HDP (*high density fiberboard*) e o SDF (*super density fiberboard*), e as chapas de fibra (ou HB, *hardboard*). Apresentam ainda que, os painéis de madeira processada mecanicamente são formados por camadas de lâminas ou sarrafos de madeira maciça e representados principalmente pelos compensados.

O uso de painéis de madeira reconstituída em substituição à madeira sólida tem ganhado destaque nas últimas décadas em função da necessidade de otimização do uso da madeira

(PEDROSA; IWAKIRI; MATOS, 2005). Segundo Lahr e Christoforo (2013), a produção de painéis de partículas teve início na década de 40 na Alemanha, devido ao isolamento do país durante a 2ª Guerra e a decorrente dificuldade em encontrar madeira de boa qualidade, a solução foi o aproveitamento de resíduos de madeira na fabricação dos painéis de partículas.

No Brasil, a produção de painéis de partículas teve início da década de 60, mais precisamente em 1966, quando entrou em operação a primeira linha de produção da empresa Placas do Paraná S. A., localizada na cidade de Curitiba, estado do Paraná (IWAKIRI et al., 2008).

Segundo Silva (2012), o painel MDP é um compósito composto por uma matriz de adesivo sintético e a fase de reforço com partículas de madeira que são combinadas com aplicação de pressão e calor para formação do painel, que pode ser fabricado em uma única camada homogênea ou com três camadas, para painéis multicamadas (conforme Figura 1), sendo as camadas da superfície constituídas de partículas de menores dimensões e a camada interna, formada por partículas maiores.

Figura 1 - Camadas do painel MDP multicamadas no sentido da espessura

Fonte: Própria autoria.

As aplicações dos painéis de partículas não se limitam apenas à fabricação de móveis, mas também apresentam funcionalidade como embalagens, componentes estruturais de paredes, pisos, coberturas de edificações e elementos estruturais engenheirados, como vigas (PEDROSA; IWAKIRI; MATOS, 2005).

Dados do Relatório do IBA de 2017 (IBA, 2017) mostram que em 2016 o Brasil se apresentou como o 8º maior produtor de painéis de madeira reconstituída do mundo, com uma

produção foi de 7,3 milhões de metros cúbicos de painéis, utilizando como principais matérias-primas as madeiras de pinus e eucalipto.

Figura 2 - Produção brasileira de painéis de madeira reconstituída em milhões (m³) no ano de 2016

Fonte: Adaptado de INDÚSTRIA BRASILEIRA DE PRODUTORES DE ÁRVORES. IBA.

Relatório anual 2017 ano base 2016. Brasília: Disponível em:

http://iba.org/images/shared/Biblioteca/IBA_RelatorioAnual2017.pdf, Acesso em: 18/09/18.

O setor brasileiro de árvores plantadas possui uma área de 7,84 milhões de hectares de reflorestamento (onde 5,7 milhões são de eucalipto e 1,6 milhão é de pinus), é responsável por 91% de toda a madeira produzida para fins industriais e 6,2% do PIB (produto interno bruto) industrial do país (IBA, 2019).

Na lista dos maiores produtores de eucalipto, Minas Gerais ocupa a primeira colocação com 25,2%, seguido de São Paulo, com 17,6% e Mato Grosso do Sul, com 14,5%, já no cultivo de pinus, o destaque do cenário produtivo é o Paraná, com 673.739 hectares (MENDES; TREICHEL; BELING, 2016). A maior parte dos painéis de partículas são de eucalipto, cultura que em 2018 apresentou uma produtividade de 36 m³/ha x ano e início da colheita aos 6,5 anos (IBA, 2019).

Segundo Mesquita et al. (2018), com o aumento da utilização de produtos de madeira, a disponibilidade da madeira diminui e seu preço aumenta, motivando assim a busca por materiais com características semelhantes, mas com maior disponibilidade e menor custo.

Os resíduos lignocelulósicos da agroindústria brasileira, como espiga de milho, casca de arroz, casca de amendoim, casca de coco, casca de mamona, bagaço de cana, entre outros,

têm sido considerados como matéria-prima promissora e uma rota de reciclagem para atender à crescente demanda dos painéis de partículas (SILVA et al., 2017).

Segundo Mendes et al. (2009), a utilização de resíduos agroindustriais para a fabricação de painéis de partículas proporciona agregação de valor aos resíduos, contribui para atender à crescente demanda por painéis de madeira, diminui a utilização de madeira e a consequente pressão sobre as florestas, além de reduzir os custos de produção dos painéis, tornando-os mais competitivos.

Recentemente, pesquisas estão sendo realizadas sobre a produção de painéis de partículas com resíduos e coprodutos agroindustriais, principalmente com a utilização do bagaço de cana-de-açúcar (BARRERO, 2015; MENDES et al., 2014; NAKANISHI, 2018; OLIVEIRA et al., 2017). Esse material, que anteriormente era considerado um resíduo, já passou a ser visto como coproduto em diversas localidades do Brasil e é gerado nos processos de produção de açúcar, etanol e cachaça.

3.1.1 BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR

O bagaço proveniente da cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum*), uma gramínea tipicamente tropical, com preferência por clima quente e úmido (FERNANDES, 1984), é um material fibroso resultante da moagem da cana nas usinas sucroalcooleiras para a obtenção do caldo (FONSECA, 2009) e, segundo dados da FAO (2018), o Brasil, ocupa o primeiro lugar dos 10 maiores produtores de cana e em 2016 sua produção foi cerca de 768,7 mil toneladas.

A produção de cana-de-açúcar, na safra 2018/19, foi de 620,44 milhões de toneladas, sendo que a região centro-oeste atingiu 136,9 milhões de toneladas e no estado de São Paulo, a produtividade da safra 2018/19 foi de 75.207 kg/ha (CONAB, 2019).

Cada tonelada de cana moída gera aproximadamente 280 kg de bagaço (SILVA; GOMES; ALSINA, 2007) e de acordo com esses dados, o Brasil gerou na safra de 2018/19 aproximadamente 2,21 milhões de toneladas de bagaço de cana-de-açúcar (BCA), sendo este considerado o resíduo agroindustrial obtido em maior quantidade no Brasil.

Silva, Gomes e Alsina (2007) apontam que grande parte do BCA produzido é utilizado pelas próprias usinas, no aquecimento de caldeiras e na geração de energia elétrica. Segundo os autores, devido à grande quantidade produzida e suas características físicas e químicas, o bagaço possui um vasto campo de utilização, dentre eles na produção de ração animal, na

produção de biomassa microbiana, na indústria química na fabricação de papel, papelão e painéis de partículas, como material alternativo na construção civil.

Mais recentemente, a geração de energia elétrica mostrou-se tão interessante quanto a produção de calor para as usinas sucroalcooleiras de maior escala, com o emprego de turbinas para este fim, tornando o processo de cogeração de eletricidade interessante ao setor (SARTORI, 2015). Silva et al. (2014a) afirmam que dentre as biomassas utilizadas para a produção de energia, o BCA é um dos resíduos mais utilizados no mundo.

Entretanto, todas as possíveis formas de reuso de um resíduo ou coproduto apresentam seu potencial de impacto. Silva et al. (2014b) estudaram o potencial de impacto ambiental do uso do BCA para geração de eletricidade no Brasil e identificaram que os principais potenciais de impacto foram o ozônio fotoquímico, a toxicidade humana pelo solo e o enriquecimento de nutrientes, causados principalmente pela queima da palha da cana-de-açúcar antes da colheita e pelas aplicações químicas durante a fase agrícola.

Pesquisas atuais relatam o uso do BCA para produção do etanol de segunda geração (AGUILAR-REYNOSA et al., 2017; ANTUNES et al., 2018; MOKOMELE et al., 2018), ou seja, a produção de etanol com o bagaço e a utilização de pré-tratamentos químicos enzimáticos que permitem a hidrólise da celulose em açúcares para fermentação.

O bagaço de cana-de-açúcar vem se mostrando tão interessante como biomassa que atualmente está sendo desenvolvida a cana energia. Segundo Silveira (2014), as pesquisas que focam atender às novas demandas do setor sucroenergético apresentam foco em obtenção de futuros cultivares de cana com aumento substancial do teor de fibra aliado a maior produtividade.

Lima (2016) aponta que o Instituto Agrônomo de Campinas (IAC) trabalha desde 2014 com hibridação de parentais selvagens da Coleção Mundial de Cana dos Estados Unidos buscando novas variedades com altos teores de fibras para geração de maior quantidade de biomassa.

Outra possível destinação para o BCA é sua utilização como entrada no processo de pirólise, que segundo Balat (2008) é um processo térmico com ausência de agente oxidante na atmosfera e resulta em três fases: sólida, líquida e gasosa.

Lima (2016) estudou a cana-energia como uma potencial fonte energética para o processo de pirólise, obtendo como produto da fase líquida o bio-óleo, o carvão vegetal como fase sólida e gás na fase gasosa. Apesar de nesse estudo ser necessário ajustar alguns parâmetros para os produtos possam sair com maior poder calorífico, todos podem ser utilizados com finalidade energética.

Estudos indicam que as cinzas provenientes da queima do bagaço ou da palha da cana cana-de-açúcar também apresentam aplicação como material pozolânico, que pode substituir parcialmente o cimento (CORDEIRO et al., 2017; ROSSIGNOLO et al., 2017; CORDEIRO, TOLEDO FILHO e FAIRBAIRN, 2008) e em ambos os casos, as amostras produzidas com as cinzas apresentaram propriedades similares às de referências.

Além desses destinos, como para produção de etanol de segunda geração, geração de energia e como pozolanas (cinzas), existem estudos incentivando o uso do bagaço de cana como matéria-prima para produção de painéis de partículas, por se tratar de um material lignocelulósico.

Farrapo et al. (2015) menciona que a utilização deste resíduo pode atender à crescente demanda no setor de painéis de partículas e seu uso em substituição parcial à madeira pode levar à redução no custo final do produto.

3.1.2 RESINA POLIURETANA DE MAMONA

Além dos materiais lignocelulósicos, outro material utilizado na fabricação de painéis de partículas é o adesivo, que pode ser natural ou sintético. Esse componente é importante tanto em implicações técnicas quanto econômicas para aplicações em madeira e materiais lignocelulósicos.

Segundo Sartori (2015) e Barrero (2015), a resina ureia formaldeído (UF) é frequentemente utilizada em escala industrial, devido ao seu baixo custo, grande disponibilidade, facilidade na aplicação, adequação ao projeto de produto e aplicabilidade final dos painéis.

Entretanto, desde o início da década de 90, Maloney (1993) menciona que as resinas com base de ureia emanam formol, um produto carcinogênico, instigando pesquisas para outros possíveis adesivos e atualmente, estudos de ACV indicam a resina UF como um dos maiores impactos ambientais, devido a sua toxicidade (SILVA, 2012; SANTOS et al., 2014).

Um adesivo relevante de origem natural que vem sendo utilizado na produção de painéis de partículas é a resina poliuretana a base de óleo de mamona (PU de mamona). Segundo Silva (2003), os poliuretanos (PU) foram desenvolvidos por Otto Bayer juntamente com outros pesquisadores em 1937 e sua comercialização, ainda na década de 30, se iniciou com espumas rígidas, adesivos e tintas.

Segundo Barrero (2015), a resina a base de óleo de mamona foi desenvolvida pelo Grupo de Química Analítica de Polímeros (GQATP) do Instituto de Química de São Carlos (IQSC) da USP e possui aplicações como: produção de próteses para várias partes do corpo humano, plásticos, fibras sintéticas, esmaltes, lubrificantes, cimento ósseo e adesivo.

Sartori (2012) e Fiorelli et al. (2011) estudaram o uso de resina PU de mamona como matriz polimérica em painéis de partículas a fim de buscar mais sustentabilidade no processo e concluíram que a mesma se mostrou eficiente na fabricação dos painéis de partículas.

Pesquisas abordando o emprego de resina PU de mamona como matriz polimérica em painéis de partículas também são impulsionadas pela tendência de uso de produtos biodegradáveis, de origem natural e ambientalmente corretos (BARRERO, 2015; CRAVO, 2016, 2013; FIORELLI et al., 2011; GALO, 2015; SARTORI, 2015).

Segundo Sartori (2015), a mamona (*Ricinus communis*) é uma planta da família *Euphorbiaceae* e dela é extraído o óleo de mamona, também conhecido como óleo de rícino e internacionalmente, como “*castor oil*”. Dados da FAO (2018), mostram que em 2016 o Brasil foi considerado o 4º maior produtor mundial de óleo de mamona, base para a resina PU de mamona.

Silva (2003) menciona que as resinas poliuretanas podem ser derivadas tanto do petróleo quanto de fontes naturais, como os óleos vegetais. A resina poliuretana à base de óleo de mamona foi inicialmente desenvolvida para a área médica como enxerto ósseo, caracterizada por não ser agressiva para o meio ambiente e para a saúde humana (GAVA et al., 2015).

A reação química entre um isocianato e um grupo hidroxila forma o uretano (ou uretana), e a polimerização do mesmo ocorre quando um composto com um ou mais isocianatos em sua estrutura reage com um polioli (SILVA, 2003), conforme representação da Figura 3.

Apesar do uso da resina PU de mamona ser pontuada em diversos estudos como um adesivo menos agressivo ao meio ambiente se comparado às resinas fenólicas, não foram

encontradas pesquisas sustentadas por alguma técnica robusta de gestão ambiental que comprovassem essa afirmação.

Figura 3 - Representação da formação de uma poliuretana

Fonte: Adaptado de SILVA, R. V. **Compósito de resina poliuretano derivada de óleo de mamona e fibras vegetais**. 2003. 154 f. Tese (Doutorado). Universidade de São Paulo. São Carlos, 2003.

A avaliação de ciclo de vida é apresentada como uma técnica de gestão ambiental (ABNT, 2009a) indicada para analisar os aspectos ambientais, capaz de analisar sistemas circulares, sistemas de serviço de produtos e sistemas para reciclagem (SCHEEPENS, VOGTLÄNDER e BREZET, 2016), todos eles baseados na economia circular.

3.2 PAINÉIS MDP COM BCA E RESINA PU DE MAMONA

Os painéis podem ser aplicados em camadas únicas e homogêneas ou multicamadas, dependendo de sua finalidade. Alguns pesquisadores estudaram a fabricação de painéis multicamadas com camadas externas de bagaço, como Bueno (2015), que utilizou camada interna de fibras de coco verde, e Nakanishi (2018) com camada interna de partículas de bagaço e bambu.

Estudos foram realizados sobre a produção de painéis MDP homogêneos com o uso de BCA e inserção de partículas de bambu (BATTISTELLE; MARCILIO; LAHR, 2009) e de folhas caulinares de bambu (BATTISTELLE et al., 2016). Em ambas as pesquisas, os painéis

obtiveram propriedades físicas e mecânicas satisfatórias e mostraram viabilidade de aplicação em larga escala.

Pesquisas sobre o uso de bagaço em substituição parcial a materiais convencionais também foram realizadas, evidenciando a preocupação ambiental em reduzir o uso da madeira e comprovando a aplicabilidade do BCA, como Mendes et al (2014) e Barros Filho et al. (2011), que adotaram o bagaço juntamente com pinus e eucalipto, e Nonaka, Umemura e Kawai (2013), que estudaram painéis de bagaço e de cavacos reciclados.

Apesar das pesquisas para produção de painéis com BCA que vêm sendo realizadas no Brasil, eles ainda não são fabricados em escala industrial (CARVALHO et al., 2015). Xu et al. (2004) mencionam que na China, desde 2001 há um incentivo governamental para substituir a madeira na produção de painéis e que países como Índia, China e Estados Unidos produzem e comercializam esse tipo de painel.

Os painéis de BCA produzidos na China foram estudados por Oliveira et al. (2017), onde houve inclusão de lâminas de pinus e eucalipto sobre os painéis, e por Carvalho et al. (2015) que exploraram a caracterização acústica de painéis de bagaço comparando-os com painéis de pinus e eucalipto. Em ambas as pesquisas os resultados foram satisfatórios, seja na primeira com a melhoria das propriedades mecânicas ou na última, na qual os painéis de baixa densidade apresentaram boa absorção acústica.

A substituição integral ou parcial da madeira por bagaço de cana-de-açúcar para produção de painéis de partículas remete à preocupação ambiental, ao uso sensato de recursos naturais e à redução de exploração de novos recursos, frente à grande quantidade de resíduos e coprodutos que podem ser incorporados prudentemente ao processo de manufatura da indústria moveleira e assim, tornar-se uma entrada de uma nova cadeia de produtos.

Segundo relatório *Circular by Design* da *European Environmental Agency* (EEA, 2017), o uso de matérias-primas que incluam reciclagem, reutilização e reforma, de forma a reduzir a geração de resíduos e a dependência da extração e importação de matérias-primas é um dos preceitos da economia circular.

A economia circular é um modelo econômico alternativo ao modelo linear tradicional de extração, produção, consumo e disposição final, e que visa manter os recursos em uso pelo

maior tempo possível, extrair o máximo valor dos mesmos e recuperar e regenerar produtos e materiais no fim de sua vida útil (WRAP, 2016).

Segundo Scheepens, Vogtänder e Brezet (2016), a Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) é uma técnica de gestão ambiental que possibilita mensurar os impactos ambientais potenciais em um sistema de produto e pode com isso, analisar e comparar sistemas circulares, de forma a contabilizar reaproveitamento de resíduos e reciclagem.

Poucos estudos são encontrados utilizando a ACV para avaliação de painéis de partículas de bagaço de cana de açúcar. Santos et al. (2014) compararam a fabricação de painéis de pinus e bagaço por ACV e obtiveram resultados que indicam que entre os painéis, o produzido com bagaço apresentou menores impactos ambientais e a resina UF utilizada foi o maior impacto ao meio ambiente.

3.3 AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA E ECONOMIA CIRCULAR

Uma das primeiras definições de Economia Circular (EC) é provavelmente a conceitualizada no relatório da Fundação Ellen MacArthur (ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2013), que estabelece a EC como um sistema industrial que é restaurativo ou regenerativo por intenção e por *design*.

Prieto-Sandoval, Jaca e Ormazabal (2018) afirmam que a economia circular representa uma mudança de paradigma na forma que a sociedade se relaciona com a natureza com o objetivo de prevenir o esgotamento de recursos, fechar fluxos de energia e materiais, e facilitar o desenvolvimento sustentável por meio de implementação nos níveis micro (empresas e consumidores), meso (agentes econômicos integrados em simbiose) e macro (cidade, regiões e governos).

A Fundação Ellen MacArthur apresenta como definição da Economia Circular um diagrama sistêmico que é dividido em ciclos biológicos e ciclos técnicos, visando o circular de produtos, componentes e materiais de forma a manter a utilidade, aumentar a vida útil e substituir materiais tanto nos ciclos biológicos quanto nos ciclos técnicos

Figura 4 - Definições da Economia Circular

Fonte: ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. **Economia Circular – Diagrama Sistêmico.**

Disponível em: < <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/pt/economia-circular/diagrama-sistêmico> > . Acesso em: 17 fev. 2020.

Prietro-Sandoval, Jaca e Ormazabal (2018) ressaltam que a disseminação do conceito de economia circular é uma forma de se atingir o desenvolvimento sustentável. A sustentabilidade segundo Yuba (2005), pode ser definida como um ponto de equilíbrio entre alguns aspectos, que em algumas definições engloba somente os aspectos: econômico, ambiental e social, entretanto a autora insere mais dois aspectos: político e cultural.

Tabela 2 - Princípio e aspectos gerais da sustentabilidade

Aspectos	Princípios e estratégias gerais de sustentabilidade
Ambiental	Manutenção da integridade ecológica por meio da prevenção das várias formas de poluição, da prudência na utilização dos recursos naturais, da preservação da diversidade da vida e do respeito à capacidade de carga dos ecossistemas.
Social	Viabilização de uma maior equidade de riquezas e de oportunidades, combatendo-se as práticas de exclusão, discriminação e reprodução da pobreza e respeitando-se a diversidade em todas as formas de expressão.
Econômico	Realização do potencial econômico que contemple prioritariamente a distribuição de riqueza e renda associada a uma redução das externalidades socio-ambientais, buscando-se resultados macrossociais positivos.
Político	Criação de mecanismos que incrementem a participação da sociedade nas tomadas de decisões, reconhecendo e respeitando os direitos de todos, superando as práticas e políticas de exclusão e que promovam o desenvolvimento da cidadania ativa.
Cultural	Promoção da diversidade e identidade cultural em todas as suas formas de expressão e representação, especialmente daquelas que identifiquem as raízes endógenas, propiciando também a conservação do patrimônio urbanístico, paisagístico e ambiental, que referenciem a história e a memória das comunidades.

Fonte: Yuba apud Silva e Shimbo ¹(2001, p.78).

Dessa forma, a partir dos princípios e estratégias desses cinco aspectos gerais da sustentabilidade apresentados por Yuba (2005), a abrangência para que um produto ou serviço seja considerado sustentável é ampla, ainda que sejam ponderados somente os três primeiros aspectos.

Ainda assim, novos produtos ou serviços podem ser apresentados buscando a sustentabilidade por apresentarem mais aspectos ou princípios e estratégias que envolvam

¹ SILVA, S. R. M.; SHIMBO, I. Proposição básica para princípios de sustentabilidade. Encontro Latino Americano sobre Edificações e Comunidades Sustentáveis, v. 2, p. 73-79, 2001.

sustentabilidade do que outros. Uma forma de mensurar o aspecto ambiental de forma consistente para avaliar ou comparar um ou mais sistema de produto ou serviço é fazer uma Avaliação de Ciclo de Vida (ACV).

Pesquisas de ACV são fundamentadas pelas normas internacionais ISO 14040 e ISO 14044, que no Brasil são representadas pelas normas NBR ISO 14040 e NBR ISO 14044. Bueno (2014) cita que a ACV tem como resultado da interpretação, conclusões robustas e, muitas vezes, recomendações para melhorias. De acordo com Todd e Curan (1999), a ACV pode ser aplicada, de acordo com o objetivo proposto, com diversas abrangências:

- ***Cradle to grave (do berço ao túmulo)*** – desde a aquisição das matérias-primas, produção, uso, tratamento pós-uso, reciclagem até a disposição final;
- ***Cradle to gate (do berço aos portões de fábrica)*** – engloba desde a aquisição e produção das matérias-primas até a produção dos produtos principal e intermediários.
- ***Gate to gate (dentro dos portões da fábrica)*** – avalia apenas a produção do produto principal;
- ***Gate to grave (dos portões da fábrica até o túmulo)*** – abrange a distribuição, uso, tratamento pós-uso, reciclagem e disposição final do produto principal.

A Figura 5 caracteriza as fases de uma ACV, como elas interagem entre si e algumas das possíveis aplicações diretas desse método. Um estudo de ACV é dividido em quatro fases: Definição de Objetivo e Escopo, Inventário de Ciclo de Vida (ICV), Avaliação de Impacto de Ciclo de Vida (AICV) e Interpretação.

Figura 5 - Estrutura da ACV: principais fases

Fonte: Adaptada de ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT, Rio de Janeiro. **NBR ISO 14040** – Gestão Ambiental – Avaliação do ciclo de vida: princípios e estrutura. Rio de Janeiro, 2009a.

O objetivo de uma ACV apresenta as razões para a execução do estudo, a aplicação pretendida, o público-alvo e se os resultados serão divulgados publicamente. Essa definição é decisiva para as outras etapas da ACV e orienta todos os aspectos detalhados para a definição de escopo (IBICT, 2014).

Tabela 3 – Conteúdo do objetivo de uma ACV

Objetivo de uma ACV
Aplicação pretendida
Limitações do estudo, suposições e impactos
Razões do estudo
Público-alvo
Encarregados do estudo

Fonte: Adaptado de Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia – IBICT. **Manual do Sistema ILCD: Sistema Internacional de Referência de dados do ciclo de vida de produtos e processos**. Brasília, 2015.

De acordo com o objetivo da pesquisa, se escolhe qual sistema do produto será estudado, ou seja, o conjunto de processos elementares, com fluxos elementares e de produto, que podem desempenhar uma ou mais funções definidas e que modela o ciclo de vida de um produto.

Figura 6 - Exemplo de um conjunto de processos elementares dentro de um sistema de produto

Fonte: Adaptado de ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT, Rio de Janeiro. **NBR ISO 14040** – Gestão Ambiental – Avaliação do ciclo de vida: princípios e estrutura. Rio de Janeiro, 2009a. Segundo a NBR ISO 14040 (ABNT, 2009a), o Inventário de Ciclo de Vida (ICV) é definido como a coleta de dados e procedimentos de cálculos que juntos irão quantificar entradas e saídas relevantes de um produto ou sistema, por exemplo, energia, matérias-primas, bem como produtos, coprodutos, resíduos, emissões atmosféricas, descartes em água e solo, entre outras saídas existentes.

Segundo o manual do IBICT (2014), o ICV pode utilizar dois tipos de modelagem: atribucional e consequential, sendo que o primeiro retrata a cadeia de abastecimento, consumo e fim de vida real ou prevista e o sistema é inserido em uma tecnosfera estática. Já a modelagem consequential, representa uma cadeia genérica e teórica, o sistema interage com os mercados em uma tecnosfera dinâmica, possibilitando alterações em demandas.

Na AICV estuda-se a significância dos impactos ambientais potenciais de um sistema de produto, utilizando os dados do ICV. Para isso são utilizadas categorias de impactos e indicadores de categorias, buscando maior entendimento para os impactos.

Segundo a NBR 14044 (ABNT, 2009b) uma categoria de impacto é uma classe que representa as questões ambientais relevantes às quais pode-se associar os resultados da análise do inventário do ciclo de vida, e o indicador de impacto é uma representação quantificável de uma categoria. Exemplos de categorias de impacto e indicadores de impactos dados pela norma são mudança climática, acidificação e forçamento radiativo infravermelho (W/m^2) e liberação de próton (H^+ aq), respectivamente.

As metodologias de AICV são divididas em “*midpoint*” (pontos intermediários) e “*endpoint*” (pontos finais), como apresentado na Figura 7. Segundo Bueno (2014), as metodologias *midpoint* apresentam um número maior de categorias de impacto e resultados mais exatos e precisos do que as avaliações *endpoint*, que consideram as áreas de saúde humana, qualidade do ecossistema e uso de recursos.

Figura 7 - Esquema de Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida

Fonte: Adaptado de EUROPEAN COMMISSION: JOINT RESEARCH CENTRE (EC-JRC). Institute for Environmental and Sustainability: **Internacional Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook** – General Guideline for Life Cycle Assessment - Detailed guidance. Luxemburgo, 2010a.

As principais metodologias de AICV são apresentadas na Tabela 4. A partir delas é possível correlacionar os resultados do ICV com as categorias de impacto escolhidas e calcular os resultados dos indicadores de categorias.

Tabela 4 - Principais metodologias de AICV

Metodologia	Desenvolvida por	País de origem
CML2002	CML	Holanda
Eco-indicator 99	PRé	Holanda
EDIP97 – EDIP2003	DTU	Dinamarca
EPS 2000	IVL	Suécia
Impact 2002+	EPFL	Suíça
LIME	AIST	Japão
LUCAS	CIRAIG	Canadá
ReCiPe	RUN + PRé + CML + RIVM	Holanda
Swiss Ecoscarcity 07	E2 + ESU-services	Suíça
TRACI	US EPA	Estados Unidos
MEEuP	VhK	Holanda

Fonte: EUROPEAN COMMISSION: JOINT RESEARCH CENTRE (EC-JCR). Institute for Environmental and Sustainability: **Internacional Reference Life Cycle Data System (ILCD)**

Handbook – General Guideline for Life Cycle Assessment - Detailed guidance. Luxemburgo, 2010a.

O método de AICV que será utilizado neste estudo é o ReCiPe. Essa metodologia, segundo o EC-JCR (2010b), é a continuidade dos métodos Eco-indicator 99 e CML 2002, integrando e harmonizando as abordagens *endpoint* e *midpoint* de forma consistente.

Segundo o EC-JCR (2010b) alguns pontos interessantes e exclusivos desse método são:

- Uso consistente de categorias *endpoints* e *midpoints*. Os *midpoints* são escolhidos o mais próximo possível dos resultados do ICV para reduzir a incerteza do indicador;
- Abordagem marginal consistente;

- Subcompartimentos ar rural e ar urbano aplicados a fatalidades e modelo de exposição para toxicidade humana;
- A maioria das categorias de impacto já foram descritas em artigos revisados por pares.

A fase de interpretação é a fase final de uma ACV, na qual é realizada a compreensão e análise dos resultados obtidos nas fases anteriores de acordo com as definições de objetivo e considerações estabelecidas no escopo do estudo. A interpretação de uma ACV permite, de acordo com Silva et al. (2015), sustentar estratégias de tomada de decisão para melhorias ambientais em uma perspectiva de ciclo de vida de um produto ou serviço.

A interpretação da ACV é a consideração e análise de todas as constatações obtidas no inventário e na avaliação de impacto. Compete a essa fase o fornecimento de resultados consistentes com o objetivo e o escopo já definidos, chegando a conclusões e prevendo possíveis recomendações.

Segundo a norma NBR 14044 (ABNT, 2009a), a fase de interpretação da ACV é uma avaliação final do estudo e pode contar com as verificações de completeza, sensibilidade e consistência, visando a confiabilidade e clareza dos resultados para que o relatório apresente a qualquer parte interessada uma visão clara e compreensível do resultado.

3.3.1 APLICAÇÕES DE ACV EM PAINÉIS MDP

As últimas décadas reúnem diversos estudos sobre a utilização de resíduos agroindustriais e adesivos alternativos de origem natural, com o intuito de inserir aos remanescentes fabris destinos mais nobres, reduzir a quantidade de subprodutos sendo descartados indevidamente, e principalmente, incluir sustentabilidade a processos industriais.

Ainda assim, de acordo com pesquisas nas bases de dados *Scopus* (de 2009 até janeiro de 2019) e *Web of Science* (de 2004 até janeiro de 2019), um total de 28 e 32 artigos foram publicados, respectivamente, relacionando as palavras-chave “*LCA*” (*Life Cycle Assessment*) e “*particleboard*”. Visto que nessa pesquisa a ACV será aplicada no contexto brasileiro, do total de artigos encontrados nas bases *Scopus* e *Web of Science*, apenas 6 e 5 artigos, respectivamente, foram referentes ao Brasil.

Tabela 5 - Revisão bibliográfica sobre aplicação da ACV em painéis MDP

Referência	Unidade funcional	Partículas	Sistema de produto	Método de AICV	Hotspots
Kouchaki-Penchah et al. (2016)	1 m ³ de MDP	Eucalipto	Portão ao portão	CML-IA	Produção de resina UF, eletricidade e transporte
Silva et al. (2013)	1 m ³ de MDP	Eucalipto	Berço ao portão	CML 2001 e USEtox	Óleo pesado e resina UF
Nakano et al. (2018)	1 m ³ de MDP	Madeira não definida	Berço ao portão	CML 2001 e USEtox	Resina UF
Santos et al. (2014)	1 m ² de MDP	Pinus e BCA (1:1)	Berço ao túmulo	EDIP 97	Eletricidade, combustíveis fósseis, resina UF
Silva et al. (2014a)	1 m ³ de MDP	Eucalipto e BCA (1:1)	Berço ao portão	CML 2001 e USEtox	Óleo pesado, eletricidade, resina UF
Medeiros et al. (2017)	1 gabinete de escritório	Eucalipto	Berço ao túmulo	ILCD 2011	Transporte e produção das matérias-primas
Iritani et al. (2015)	1 guarda-roupas feito com MDP	Madeira não definida	Berço ao portão	EDIP-97	Suprimento de matérias-primas e distribuição de produto

Fonte: Própria autoria.

Rivela et al. (2006) fez um Inventário de Ciclo de Vida (ICV) de painéis de partículas e resalta que a ACV possibilita, juntamente com o desenvolvimento do princípio da substituição, que os encargos ambientais de todos os produtos ao longo do ciclo de vida sejam claramente demonstrados, de forma que desde as fases de desenvolvimento de produto, seu uso, reciclagem e descarte, possam minimizar os possíveis encargos ambientais a níveis competitivos comercialmente.

Algumas pesquisas recentes mencionam o uso da ACV para análise dos possíveis impactos ambientais no processo produtivo de painéis. Silva (2012) estudou ACV da produção do painel de madeira MDP no Brasil e os principais contribuintes para os impactos ambientais: a madeira e a resina UF, sendo este último um destaque significativo à toxicidade humana.

Silva et al. (2014a) apresentaram, em seu estudo de caso sobre a adição de bagaço de cana na manufatura de painéis de partículas, conclusões de que os principais impactos ambientais foram ocasionados pelas entradas de combustível pesado, eletricidade e resina UF.

Kouchaki-Penchah et al. (2016) fizeram ACV *gate to gate* no processo de produção de painéis de partículas no Irã. Resultados da AICV a partir da metodologia CML apontaram que o subsistema de modelagem de placa foi o principal contribuinte para a maioria das categorias de impacto e para o subsistema de produção de resina foi a ureia formaldeído.

Foi realizado um estudo simplificado de ACV em painéis de resíduos de madeira de pinus (*Pinus sp.*) e de teca (*Tectona grandis*) e resíduo de resina à base de epóxi para tinta foi utilizado em substituição parcial à resina ureia formaldeído em até 40% por Souza et al. (2018). Os resultados mostraram que os painéis de alta densidade, com maiores proporções de resíduo de resina epóxi e de madeira teca apresentaram as melhores propriedades físicas e mecânicas e a ACV simplificada indicou que os painéis alternativos apresentaram menores impactos ambientais do que os convencionais.

Iritani et al. (2015) estudaram a ACV como uma análise para apresentar estratégias sustentáveis na produção de guarda-roupas feito de painéis MDP, utilizando três cenários com foco no uso de madeira reciclada como matéria-prima em vez de madeira virgem. Os resultados mostraram que o uso de 100% de resíduos de madeira foi mais sustentável porque houve uma minimização global de impactos potenciais e sugerem novas estratégias para a indústria moveleira.

Em relação aos estudos que apresentam como produto o gabinete de escritório e o guarda-roupas, o processo produtivo envolve mais etapas do que a produção de um painel de partículas, dessa forma não foram utilizados como comparativos para a ACV neste estudo.

Santos et al. (2014) aplicaram uma ACV comparativa entre um painel de partículas de aparas de pinus e outro de partículas de bagaço de cana-de-açúcar. Os resultados indicaram que o painel de bagaço de cana apresentou menores impactos ambientais potenciais se comparado ao painel de pinus. Ainda assim, o principal impacto ambiental foi devido ao uso da resina UF em ambos os casos.

Considerando a categoria de impacto (CI) de aquecimento global (AG), para a produção de 1m³ de painel no Japão há a emissão de 440 kg de CO₂ equivalentes (Nakano et al., 2018), no Irã o valor é em torno de 433 kg de CO₂ equivalentes (Kouchaki-Penchah et al., 2016).

O estudo de Silva et al. (2014a) aponta o valor de 319 kg de CO₂ equivalentes emitidos na produção de 1m³ de painel de BCA e faz os cálculos de captura de carbono durante a fotossíntese pela cana-de-açúcar, alterando esse valor para - 364 kg de CO₂ equivalentes. Os artigos que utilizaram madeira não estudaram a captura de carbono.

A produção de painel de partículas com uso do BCA manifestou maior impacto para a CI de eutrofização (ET), 75% relacionado à produção do BCA e 24% relacionado a produção do painel (SILVA et al., 2014a). Os principais impactos referentes a produção do bagaço de cana-de-açúcar estão relacionados a aplicação de químicos, como fertilizantes nitrogenados e processos de colheita, como o diesel utilizado. Na fase de produção do painel, os impactos foram principalmente atribuídos à produção da resina ureia-formaldeído e à combustão de óleo combustível pesado na planta industrial.

Estudos que vinculem ACV e óleo de mamona são poucos, visto que foram encontrados nas bases de dados *Scopus* e *Web of Science*, respectivamente, 6 e 7 artigos. Estes são destinados a biorrefinarias ou processo produtivo de biodiesel (AMOURI et al., 2017; HELLING; RUSSELL, 2009; KHOSHNEVISAN et al., 2018). Não foram encontrados estudos de ACV de painéis MDP com resina da mamona ou mesmo da produção dessa resina.

Os estudos atuais sobre ACV não abrangem todos os novos painéis que vem sendo produzidos em estudos sobre a incorporação de resíduos e coprodutos agroindustriais como matérias-primas, bem como os diferentes tipos de resina que podem ser aplicados, incentivando assim pesquisas nessa área.

Visto que não há estudos suficientes sobre o desempenho ambiental da utilização de bagaço de cana-de-açúcar e resina PU de mamona para produção de painéis de partículas, o intuito desta pesquisa é avaliar o desempenho ambiental de painéis de partículas com subprodutos agroindustriais em comparação aos convencionais de madeira, através de um estudo comparativo de ACV (do berço ao túmulo) com utilização de dados no contexto brasileiro.

4. METODOLOGIA

Para a definição da metodologia aplicada, foi realizada uma revisão bibliográfica baseada em normas e estudos já existentes para o estudo da técnica de ACV. Foram encontrados em literatura, estudos já existentes de manufatura de painéis MDP convencionais e com uso do bagaço de cana-de-açúcar e a da resina poliuretana de mamona. Dessa forma, foi definida uma faixa de densidade, espessura e propriedades físicas e mecânicas para a seleção de 5 painéis desejados para estudo.

Alguns painéis não foram encontrados em literatura, com as especificações requeridas e dessa forma, duas formulações serão produzidas em laboratório para continuidade e completeza da pesquisa.

Com todos os painéis prontos, foram coletados dados para o Inventário (banco de dados e empresas produtoras de resina de mamona) e assim, foi realizada a ACV comparativa dos 5 painéis, ou seja, serão realizadas 5 ACVs e os resultados serão comparados, discutidos e interpretados.

Dessa forma, a metodologia que foi utilizada neste estudo foi dividida nas etapas abaixo:

- a) Definições da metodologia de ACV, como delimitação de objetivo e escopo;
- b) Definição de revisão de literatura de estudos já existentes de painéis MDP, tendo como principais matérias-primas: bagaço de cana-de-açúcar, eucalipto, resina ureia-formaldeído e resina poliuretana de mamona, que atendam à norma brasileira NBR ISO 14810 - Painéis de partículas de média densidade para a categoria de painéis não estruturais para uso interno em condições secas;
- c) Produção de painéis de média densidade de bagaço de cana-de-açúcar, madeira de eucalipto e resina poliuretana de mamona, e realização de ensaios físicos e mecânicos;
- d) Aplicação comparativa da ACV em vedação de ambientes com o uso de painéis MDP em cinco diferentes formulações;
- e) Interpretação, discussão e conclusões do estudo.

As etapas acima seguiram as definições teóricas delineadas abaixo para acurácia dos resultados a serem obtidos ao final deste estudo.

4.1 DEFINIÇÕES DA METODOLOGIA DE ACV

Os principais conceitos e metodologia de aplicação da técnica de ACV foram pautados no Manual do Sistema ILCD do IBICT – Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia (IBICT, 2014) e nas normas brasileiras NBR ISO 14040 (ABNT, 2009a) e NBR ISO 14044 (ABNT, 2009b), ambas seguindo normas internacionais ISO (International Organization for Standardization).

A primeira etapa da metodologia envolveu estudo sobre conceitos e estudos de caso sobre avaliação de ciclo de vida, seu conteúdo e as possíveis finalidades onde pode ser aplicada, bem como estudos de caso na área de materiais alternativos com resíduos da agroindústria. Estudos nacionais e internacionais sobre ACV em painéis de partículas foram utilizados como base para essa pesquisa.

As primeiras definições metodológicas da técnica de ACV são estabelecidas na delimitação do objetivo e escopo do presente estudo, visto que na primeira fase define-se todo o conteúdo, a abrangência e a finalidade da ACV. A definição do objetivo e escopo influencia todo o restante da avaliação, dessa forma deve ser considerada de forma minuciosa e com a cobertura correta.

4.1.1 DEFINIÇÃO DE OBJETIVO

O objetivo da ACV para o presente estudo apresentou os conteúdos de: aplicação pretendida; limitações do estudo, suposições e impactos; razões do estudo; público-alvo; comparações divulgadas publicamente e encarregados do estudo, e ambos serão definidos nos subitens abaixo.

4.1.1.1 Aplicação pretendida

O presente estudo tem como finalidade a comparação dos potenciais impactos ambientais de diferentes painéis MDP não estruturais para uso em ambiente interno e condições secas:

- a) Painel MDP de bagaço de cana-de-açúcar e resina ureia formaldeído;
- b) Painel MDP de bagaço de cana-de-açúcar e resina poliuretana de mamona;

- c) Paineis MDP de bagaço de cana-de-açúcar e eucalipto, e resina ureia formaldeído;
- d) Paineis MDP de bagaço de cana-de-açúcar e eucalipto, e resina poliuretana de mamona;
- e) Paineis MDP convencional referência (madeira de eucalipto e resina ureia formaldeído).

O estudo visa a recomendação de matérias-primas que apresentem menores potenciais de impacto ao meio ambiente para a fabricação de painéis de partículas para posterior aplicação em fins acadêmicos e de pesquisa.

4.1.1.2 Limitações do estudo, suposições e impactos

O presente estudo utilizou dados secundários extraídos de banco de dados que apresenta as informações em contexto predominantemente europeu. A metodologia de AICV que foi utilizada neste trabalho, ReCiPe 2008, foi baseada em modelos europeus, entretanto essa limitação só é válida para indicadores de escopo regional, visto que os indicadores que são embasados em gases de efeito estufa (GEE) apresentam escopo global.

Ainda assim, para amenizar as possíveis interferências do banco de dados se apresentarem em parte no contexto europeu, será utilizado um *mix* de energia que abrange o cenário brasileiro, considerando o Balanço Energético Nacional (BEN, 2018).

Como suposições utilizadas neste estudo, o processo de produção de painéis MDP será considerado similar para ambos os painéis, apenas será comparado o consumo energético para ambos os processos e a etapa de descasque das toras de eucalipto será reduzido do montante total para corresponder ao possível consumo energético de uma produção industrial de painéis de bagaço de cana.

Os inventários utilizados neste estudo são de dados secundários e portanto, não há divisão de subprocessos dentro de cada processo, por exemplo, a produção de bagaço de cana-de-açúcar não está dividida em fase agrícola e fase industrial.

O inventário da produção de BCA refere-se à produção de 1 kg de açúcar, respectivamente 1 kg de etanol (95% p / p base seca, ou seja, 1,05 kg de etanol hidratado 95%

base úmida), 1 kg de excesso de bagaço (base úmida, 79% matéria seca), 1 kWh de eletricidade e 1 kg de vinhaça, segundo detalhes do processo no *software* GaBi.

O inventário que representa a produção de eucalipto *ssp* está situado na região Centro-Sul do Brasil. O conjunto de dados refere-se à madeira com casca, densidade média de 496kg / m³ e teor de umidade de 64%. Desde a plantação, operações de colheita e extração. Inclui os insumos para os processos de produção florestal e as principais emissões locais, incluindo o carregamento da madeira em caminhões. Bens de capital (por exemplo, construção de tratores e caminhões), bem como atividades de pessoal, por exemplo, transporte de trabalhadores de e para o local de trabalho, não foram incluídos nos limites do sistema.

No inventário do processo de produção dos painéis, o conjunto de dados representa a produção painel não revestido, com densidade média de 630kg / m³ e 8% de umidade, para uso interno (indústria de móveis), a partir de madeira virgem (espécies de eucalipto). Da recepção de matérias-primas ao portão da fábrica. Inclui os insumos para os processos de produção e o carregamento do produto em caminhões e as principais emissões do processo. Bens de capital, como máquinas industriais, bem como atividades de pessoal, por exemplo, transporte de trabalhadores para e do local de trabalho, não foram incluídos nos limites do sistema.

4.1.1.3 Razões do estudo

Com base nas referências apresentadas acima, painéis de bagaço apresentam propriedades físicas e mecânicas similares ou até superiores ao convencional, entretanto faltam estudos robustos sobre os aspectos ambientais de ambos, incluindo as principais matérias-primas utilizadas (bagaço de cana, madeira de eucalipto, resina ureia formaldeído, resina poliuretana de mamona).

4.1.1.4 Público-alvo

Esta pesquisa é um trabalho científico com finalidade de aplicação voltada à academia e direcionamento principalmente para estudos relacionados à novos materiais desenvolvidos com incorporação de resíduos agroindustriais. Trata-se de uma avaliação comparativa e o final deste estudo será divulgado publicamente

4.1.1.5 Encarregados do estudo

O grupo de trabalho encarregado desse estudo é composto pelos membros: Letícia Missiatto Gavioli, Prof. Dr. João Adriano Rossignolo, Prof. Dr^a Cristiane Bueno e o laboratório de Construções Rurais e Ambiente.

4.1.2 ESCOPO

O sistema de produto a ser estudado nessa pesquisa é o sistema de produção de painéis de partículas de média densidade, tendo como processos elementares a produção de todas as matérias-primas principais, como a cana-de-açúcar e posteriormente o bagaço, as toras de eucalipto, as resinas ureia-formaldeído e poliuretana a base de mamona.

A função do sistema é a vedação por meio de painéis não estruturais para uso interno em condições secas, conforme a norma NBR14810 (ABNT, 2018) e para a quantificação dessa função, foi definida a unidade funcional de 1m² de painel MDP, com espessura nominal de 15 mm e densidade variável entre 630 kg/m³ e 680 kg/m³. A vida útil de ambos os painéis foi considerada a mesma, pois não foram encontrados estudos sobre a degradação de painéis MDP com resina PU de mamona e BCA.

Os fluxos de referência para o estudo estão apresentados abaixo e a quantidade apresentada é referente aos valores citados nos artigos que serão utilizados como referência para os painéis 1, 3 e 5.

- a) **Painel 1:** MDP com 9,07 kg de bagaço de cana-de-açúcar e 1,008 kg de resina ureia-formaldeído;
- b) **Painel 2:** MDP com 8,288 kg de bagaço de cana-de-açúcar e 1,463 kg de resina poliuretana de mamona;
- c) **Painel 3:** MDP com 4,448 kg de bagaço de cana-de-açúcar, 4,448 kg de madeira de eucalipto e 0,989 kg de resina ureia-formaldeído;
- d) **Painel 4:** MDP com 4,144 kg de bagaço de cana-de-açúcar, 4,144 kg de madeira de eucalipto e 1,463 kg de resina PU de mamona;
- e) **Painel 5:** MDP convencional com 10,31 kg de madeira de eucalipto e 1,15 kg de resina ureia-formaldeído.

Para os painéis 2 e 4, os valores são referentes aos cálculos de quantidade mássica, apresentados abaixo, em relação ao volume e densidade teórica referentes à unidade funcional.

$$\rho = \frac{m}{V}$$

Fonte: HIBBELER (2010).

Onde:

ρ = densidade aparente em quilogramas por metros cúbicos (kg/m³);

m = massa em quilogramas (kg);

v = volume em metros cúbicos (m³).

Para a fabricação de um painel de 1m² de área, 15 mm de espessura (volume de 0,015 m³) e densidade de 650 kg/m³, é necessário 9,75 kg de material para produção, sendo que dentro desse valor estão incluídas as quantidades mássicas de resina e material lignocelulósico.

Considerando uma proporção de 15% de resina PU de mamona, a quantidade de resina é de 1,463 kg e 8,288 kg de material lignocelulósico. Para o painel 4, no qual serão utilizados dois materiais lignocelulósicos em proporções iguais, o valor de 8,288 kg é dividido igualmente para o bagaço de cana e madeira de eucalipto.

O intuito desse estudo, é comparar os impactos ambientais dos 5 diferentes painéis MDP já citados anteriormente, e alguns processos são iguais para ambos os painéis, como as fases de consumo e disposição final. Dessa forma, os impactos serão iguais para ambos os painéis, e por se tratar de uma ACV comparativa, esses processos serão desconsiderados na avaliação e estão sombreados na representação gráfica das fronteiras abaixo.

O escopo geográfico deste estudo está apresentado na Figura 8, situado no interior do estado de São Paulo e o transporte está sendo considerado para as principais matérias-primas: eucalipto, BCA, resina UF e resina PU de mamona.

Figura 8 - Escopo geográfico do estudo

Fonte: Própria autoria.

No que diz respeito à alocação do BCA, o processo produtivo já vem com alocação dos impactos apenas para o bagaço de cana-de-açúcar. Na literatura (SILVA et al., 2014a), onde 1,21 t de cana-de-açúcar gera 343,6 kg de bagaço e 84,11 kg de etanol, o valor de alocação do bagaço de cana é de 28,4%.

O *mix* energético deste estudo foi baseado no Balanço Energético Nacional (EMPRESA, 2019) e as proporções relativas às fontes energéticas foram utilizadas de acordo com os dados da matriz energética brasileira do relatório, incluindo dados de autoprodução e importação, apresentados na Tabela 6. Não foi utilizado o mix energético do banco de dados do software porque este se encontrava em defasagem com a data da pesquisa.

Segundo o mesmo relatório, diante da capacidade instalada no Brasil para geração de energia por biomassa (14.790 MW), o bagaço da cana-de-açúcar é responsável por aproximadamente 76,9% , com capacidade instalada de 11.368 MW (EMPRESA, 2019). Dessa forma, do total adotado para biomassa, foi considerado o percentual de 76,9% para BCA, ou seja, 6,5% da matriz energética foi considerada por geração de eletricidade a partir do BCA.

Tabela 6 - Oferta interna de energia elétrica por fonte ano base 2018

Fontes	Quantidade (%)
Hidráulica	66,6
Gás Natural	8,6
Biomassa	8,5
Eólica	7,6
Carvão mineral e derivados	3,2
Nuclear	2,5
Derivados do petróleo	2,4
Solar	0,5

Fonte: EMPRESA, DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanco Energético Nacional (BEN) 2019: Ano base 2018**. Rio de Janeiro: EPE, 2019.

A representação gráfica das fronteiras do sistema contempla os principais processos e fluxos elementares e está apresentada como uma figura para cada fluxo de referência que foi estudado.

a) Fronteiras do **Painel 1**:

Figura 9 - Fronteiras referentes ao Painel 1

Fonte: Própria autoria.

b) Fronteiras do **Painel 2**:

Figura 10 - Fronteiras referentes ao Painel 2

Fonte: Própria autoria.

c) Fronteiras do **Painel 3**:

Figura 11 - Fronteiras referentes ao Painel 3

Fonte: Própria autoria.

d) Fronteiras do **Painel 4**:

Figura 12 - Fronteiras referentes ao Painel 4

Fonte: Própria autoria.

e) Fronteiras do **Painel 5**:

Figura 13 - Fronteiras referentes ao Painel 5

Fonte: Própria autoria.

4.2 DEFINIÇÃO DE ESTUDOS JÁ EXISTENTES DE PAINÉIS MDP

Para a aplicação da técnica de ACV, foram escolhidos na literatura estudos de produção de painéis de partículas que contivessem em suas formulações as principais matérias-primas: bagaço de cana-de-açúcar, resina poliuretana de mamona, madeira de eucalipto e resina ureia formaldeído.

Além disso, definiu-se alguns critérios para a escolha, como a espessura em 15 mm, densidade média, atendimento à norma NBR 14810 - Painéis de partículas de média densidade (ABNT, 2018) e ANSI A208.1 (AMERICAN, 1993), conforme a Tabela 7.

Tabela 7 - Requisitos para painéis não estruturais de uso interno em condições secas

Propriedades	Unidade	Espessura nominal de 13 a 20 mm (NBR14810)	M -1 e M - S (ANSI 208.1)
Inchamento 24h	%	≤ 22	NS
Resistência à tração perpendicular	MPa	$\geq 0,35$	$\geq 0,40$
Resistência à flexão estática		≥ 11	≥ 11
Módulo de elasticidade		≥ 1600	≥ 1725

Fonte: Adaptado de ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT

NBR14810 – Painéis de partículas de média densidade. Parte 2: Requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2018. AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE. **ANSI A208.1**..

Gaithersburg, 1993.

Dessa forma, foi realizada uma busca em literatura nacional para encontrar estudos de painéis MDP que satisfizessem esses requisitos e matérias-primas já definidos, bem como algumas formulações pré-estabelecidas a fim de se obter uma maior abrangência para a ACV comparativa. A Figura 14 apresenta as formulações buscadas na literatura para aplicação da ACV.

Figura 14 - Representação gráfica das formulações de MDP utilizadas no estudo

Fonte: Própria autoria.

A partir da busca realizada, os dados necessários das formulações dos painéis 1, 2 e 5 serão retirados da literatura e como não foram encontradas formulações dos painéis 2 e 4 para média densidade, essas foram produzidas em laboratório e posteriormente foram realizados os ensaios apresentados na Tabela 7. Assim, seguem na Tabela 8 as principais referências que foram utilizadas para as formulações ao longo dessa pesquisa.

Tabela 8 - Painéis utilizados na ACV

Painel	Referências	Densidade (kg/m³)
1	(MENDES et al., 2014)	672
2	Produzido pela aluna.	650*
3	(MENDES et al., 2014)	659
4	Produzido pela aluna.	650*
5	(SILVA, 2012)	630

Fonte: Própria autoria.

*As densidades apresentadas para os painéis 2 e 4 que são densidades teóricas, definidas para a produção dos painéis.

Os painéis que foram utilizados para realização da ACV apresentam densidade variando entre 630 kg/m^3 e 680 kg/m^3 , enquadrando-se como painéis de partículas de média densidade, e com espessura de 1,5 cm.

Ambos os painéis 1, 3 e 5 atendem os requisitos de módulo de ruptura, módulo de elasticidade, resistência à tração perpendicular e inchamento 24 h, estipulados pela norma NBR 14810 (ABNT, 2018). Os painéis 2 e 4, que foram produzidos em laboratório, também devem atender aos requisitos da norma para painéis não estruturais, uso interno em condições secas.

4.3 PRODUÇÃO DE PAINÉIS MDP

Os painéis 2 e 4 foram produzidos em laboratório, utilizando partículas de bagaço de cana-de-açúcar (BCA) e resina poliuretana bi componente a base de óleo de mamona (resina PU de mamona) para o Paine 2 e para o Paine 4, partículas de BCA e eucalipto (mesma quantidade em massa) e resina PU de mamona.

Primeiramente o BCA foi seco em estufa com circulação de ar quente, a temperatura de 60°C por 72 horas para que a umidade seja próxima aos 8 %, conforme a Figura 15. Após a secagem, as partículas passaram por um moinho de facas com peneira acoplada de 1cm. Então, o BCA passou por um jogo de peneiras vibratórias para remoção das partículas abaixo de 0,6 mm e acima de 8 mm, pois não são adequadas à produção de painéis.

Figura 15 - a) Estufa com circulação de ar quente; b) Estufa com bagaço de cana-de-açúcar para secagem

Fonte: Própria autoria.

O eucalipto foi doado em pedaços e estes foram uniformizados em serra para serem inseridos no bocal do moinho de lascas. Posteriormente, as lascas foram secas em estufa com circulação de ar quente a temperatura de 65 °C por 48 horas. Já secas, as lascas passaram por um moinho de facas com peneira acoplada de 1cm para formação das partículas. Estas, passaram por um jogo de peneiras vibratórias (Figura 16) para remoção das partículas abaixo de 0,6 mm e acima de 8 mm.

Figura 16 - Jogo de peneiras vibratórias utilizadas para seleção de partículas

Fonte: Própria autoria.

Um dia antes da moldagem, ambas as partículas foram colocadas em estufa com circulação de ar quente, a temperatura de 60 °C por 24 horas para remoção de qualquer acréscimo de umidade. As partículas foram inseridas em uma betoneira para homogeneização das mesmas e a resina poliuretana bi componente a base de óleo de mamona foi adicionada em proporção de 12% em relação a massa total, com proporção de 1:1,5 (uma parte do componente A, pré-polímero + uma parte e meia do componente B, polioli), por meio de um aspersor para melhor homogeneização e agitados por 5 minutos.

Após a mistura, as partículas juntamente com a resina foram colocadas em um molde de madeira com dimensão de 550 mm x 550 mm para formação de um colchão de partículas. Esse colchão foi pré-prensado manualmente e depois colocado em uma prensa hidráulica com aquecimento por 10 minutos nas condições de 100°C de temperatura e 5 MPa de pressão.

Figura 17 - Partículas de bagaço de cana-de-açúcar e eucalipto misturadas

Fonte: Própria autoria

Os painéis foram retirados da prensa e foram acondicionados por 72 horas em temperatura ambiente para completar a cura da resina. Foram produzidos 4 painéis de cada formulação para que fossem realizados os ensaios de densidade aparente, inchamento 24h, resistência à tração perpendicular, resistência à flexão estática e módulo de elasticidade, que estão descritos nos itens a seguir e são necessários para o atendimento da norma NBR 14810.

4.3.1 DENSIDADE APARENTE (ABNT, 2018)

O ensaio para determinação de densidade aparente descrito a seguir é fundamentado na norma NBR 14810 Parte 2: Requisitos e Métodos de Ensaio.

Para determinar a densidade aparente dos painéis, foram utilizados dez corpos de prova medindo 50 mm x 50 mm, seguindo o plano de corte presente na norma.

Os corpos de prova foram estabilizados em câmara climática até atingir a umidade de equilíbrio, nas condições de 65 ± 5 % de umidade relativa e 20 ± 3 °C de temperatura, sendo que a umidade de equilíbrio é considerada quando o resultado de duas pesagens subsequentes

dos corpos de prova, em um intervalo de 24 h, não diferir mais do que 0,1 % da massa do corpo de prova.

A densidade de cada um dos corpos de prova foi calculada pela seguinte equação, com precisão de 1 kg/m³:

$$D = \frac{M}{V} \times 1\,000\,000$$

Sendo:

$$V = b1 \times b2 \times e$$

Onde:

D é a densidade do corpo de prova, expressa em quilogramas por metro cúbico (kg/m³);

M é a massa do corpo de prova, expressa em gramas (g);

V é o volume do corpo de prova, expresso em milímetros cúbicos (mm³);

b1 e b2 são as dimensões do corpo de prova, expressas em milímetros (mm);

e é a espessura do corpo de prova, expressa em milímetros (mm).

Em seguida, a densidade média (D_{média}) foi calculada e o resultado expresso em quilogramas por metro cúbico, com precisão de 1 kg/m³.

4.3.2 INCHAMENTO 24h (ABNT, 2018)

O ensaio para determinação de inchamento 24h descrito a seguir é fundamentado na norma NBR 14810 Parte 2: Requisitos e Métodos de Ensaio.

Para determinar o inchamento 24h dos painéis, foram utilizados dez corpos de prova medindo 50 mm x 50 mm, seguindo o plano de corte presente na norma.

Os corpos de prova foram estabilizados em câmara climática até atingir a umidade de equilíbrio, nas condições de 65 ± 5 % de umidade relativa e 20 ± 3 °C de temperatura, sendo que a umidade de equilíbrio é considerada quando o resultado de duas pesagens subsequentes dos corpos de prova, em um intervalo de 24 h, não diferir mais do que 0,1 % da massa do corpo de prova.

A espessura dos corpos de prova foi medida em seu centro, conforme especificado pela norma, antes da imersão em água. Foi inserida identificação não removível em água nos mesmos, para comparação após imersão.

O recipiente foi cheio com água deionizada, de modo que, o corpo de prova estava submerso, pois o nível de água estava acima da superfície superior do corpo de prova. A norma sugere um dispositivo para manter os corpos de prova submersos no recipiente e nesse estudo foram utilizadas peneiras.

Após 24h de imersão, os corpos de prova foram retirados do recipiente e o excesso de água foi removido com papel absorvente. Subsequentemente, a espessura dos corpos de prova foi medida em seu centro, com resolução de 0,01 mm.

Para o cálculo de inchamento em espessura 24h, foi utilizada a equação abaixo:

$$I = \frac{E1 - E0}{E0} \times 100$$

Onde:

I é o inchamento em espessura do corpo de prova, expresso em porcentagem (%);

E1 é a espessura do corpo de prova após o período de imersão considerado, expressa em milímetros (mm);

E0 é a espessura do corpo de prova antes da imersão, expressa em milímetros (mm).

O resultado será a média dos inchamentos dos corpos de prova analisados, expresso em porcentagem, com precisão de 0,1 %.

4.3.3 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO PERPENDICULAR (ABNT, 2018)

O ensaio para determinação de resistência à tração perpendicular descrito a seguir é fundamentado na norma NBR 14810 Parte 2: Requisitos e Métodos de Ensaio.

Para determinar a resistência à tração perpendicular dos painéis, foram utilizados dez corpos de prova medindo 50 mm x 50 mm, seguindo o plano de corte presente na norma.

Os corpos de prova foram estabilizados em câmara climática até atingir a umidade de equilíbrio, nas condições de 65 ± 5 % de umidade relativa e 20 ± 3 °C de temperatura, sendo

que a umidade de equilíbrio é considerada quando o resultado de duas pesagens subsequentes dos corpos de prova, em um intervalo de 24 h, não diferir mais do que 0,1 % da massa do corpo de prova.

As laterais dos corpos de prova foram medidas e suas superfícies superiores e inferiores deverão coladas em blocos de tração. Foi esperado no mínimo 12 h para a total secagem dos mesmos antes do ensaio. Os blocos de tração foram encaixados e fixados nas garras da máquina universal de ensaios mecânicos.

Figura 18 - Corpo de prova após ensaio de resistência à tração perpendicular

Fonte: Própria autoria.

A resistência à tração perpendicular de cada corpo de prova foi calculada pela equação abaixo:

$$TP = \frac{P}{S}$$

Sendo:

$$S = b1 \times b2$$

Onde:

TP é a resistência à tração perpendicular, expressa em newtons por milímetro quadrado (N/mm^2);

P é a carga na ruptura, expressa em newtons (N);

S é a área da superfície do corpo de prova, expressa em milímetros quadrados (mm^2);

b1 e b2 são as dimensões do corpo de prova, expressas em milímetros (mm).

O resultado foi a média da resistência à tração perpendicular verificada nos corpos de prova ensaiados, expresso em newtons por milímetro quadrado, com precisão de $0,01 \text{ N/mm}^2$.

4.3.4 RESISTÊNCIA À FLEXÃO ESTÁTICA E MÓDULO DE ELASTICIDADE (ABNT, 2018)

O ensaio para determinação de resistência à flexão estática e módulo de elasticidade descrito a seguir é fundamentado na norma NBR 14810 Parte 2: Requisitos e Métodos de Ensaio.

Foram extraídos dos painéis de partículas dez corpos de prova retangulares medindo $350 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$, seguindo o plano de corte apresentado em norma.

Os corpos de prova foram estabilizados em câmara climática até atingir a umidade de equilíbrio, nas condições de $65 \pm 5 \%$ de umidade relativa e $20 \pm 3 \text{ }^\circ\text{C}$ de temperatura, sendo que a umidade de equilíbrio é considerada quando o resultado de duas pesagens subsequentes dos corpos de prova, em um intervalo de 24 h, não diferir mais do que $0,1 \%$ da massa do corpo de prova.

Foram realizadas três medições de espessura e largura para cada corpo de prova. Os extremos do corpo de prova foram colocados sobre os dois apoios inferiores da máquina universal de ensaios mecânicos e o indicador de carga da máquina será zerado. Para o início do ensaio, a máquina foi acionada com velocidade constante.

Figura 19 - a) Máquina universal de ensaios mecânicos preparada para ensaio de resistência à flexão estática; b) Ruptura dos corpos de prova após o ensaio de resistência à flexão estática

Fonte: Própria autoria.

O cálculo da resistência à flexão estática foi realizado com o uso da equação abaixo:

$$MOR = \frac{1,5 \times (P \times D)}{B \times (E)^2}$$

Onde:

MOR é o módulo de resistência à flexão estática, expresso em newtons por milímetro quadrado (N/mm²);

P é a carga de ruptura lida no indicador de cargas, expressa em newtons (N);

D é a distância entre apoios do aparelho, expressa em milímetros (mm);

B é a largura do corpo de prova, expressa em milímetros (mm);

E é a espessura do corpo de prova, expressa em milímetros (mm).

O cálculo do módulo de elasticidade foi realizado com o uso da equação abaixo:

$$MOE = \frac{P1 \times D^3}{d \times 4 \times B \times E^3}$$

Onde:

MOE é o módulo de elasticidade, expresso em newtons por milímetro quadrado (N/mm^2);

P1 é a carga no limite proporcional, lida no indicador de cargas, expressa em newtons (N);

D é a distância entre os apoios do aparelho, expressa em milímetros (mm);

d é a deflexão, expressa em milímetros (mm), correspondente à carga P1;

B é a largura do corpo de prova, expressa em milímetros (mm);

E é a espessura do corpo de prova, expressa em milímetros (mm).

O resultado do ensaio foi a média dos resultados dos corpos de prova ensaiados, expresso em Newtons por milímetro quadrado, com precisão de 1 N/mm^2 para o MOR e de 10 N/mm^2 para o MOE.

4.1 ACV COMPARATIVA

Nesse estudo foi utilizado o software GaBi 6 e a maioria dos dados foi provida do banco de dados Ecoinvent 2.01 e em sua maioria a origem foi internacional. Dessa forma, para que o cenário fosse o mais próximo do brasileiro, foi criado um processo para o *mix* energético brasileiro, de acordo com o Balanço Energético Nacional (BEN, 2018) e este alimentou todos os processos dentro da fronteira.

Após a revisão bibliográfica e a coleta de todos os dados necessários, o estudo passou a ser uma ACV comparativa de um sistema construtivo de vedação interna para uso em condições secas com diferentes matérias-primas, totalizando 5 diferentes painéis.

Os painéis que foram comparados por meio da técnica de ACV neste estudo, apresentaram propriedades físicas e mecânicas dentro da mesma faixa estabelecida conforme a norma NBR14810 (ABNT, 2018), de forma a garantir uma comparação transparente e justa dos produtos.

Dessa forma, foi aplicada uma ACV para cada painel, seguindo a metodologia estabelecida pelas normas NBR ISO 14040 (ABNT, 2009a) e NBR ISO 14044 (ABNT, 2009b) e pelo Manual do Sistema ILCD do IBICT – Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia (IBICT, 2014).

Os dados que foram utilizados neste estudo são um misto de dados secundários, obtidos do banco de dados do Ecoinvent 2.01, e dados primários (quantidade de energia para produção da resina poliuretana de mamona). Foi utilizado o software GaBi 6 para o tratamento dos dados do inventário e para avaliação de impactos do ciclo de vida dos sistemas de produtos.

A escolha do software baseou-se na quantidade de utilização do mesmo em trabalhos científicos e a metodologia que será utilizada para caracterização dos impactos é a ReCiPe. A escolha da metodologia ReCiPe foi respaldada pelo estudo de Bueno (2014), onde foi realizada uma análise de sensibilidade com diferentes metodologias de caracterização para diferentes tipos de vedação.

Este estudo consiste em uma ACV comparativa de um mesmo sistema de vedação interna para ambientes secos, por meio de 5 diferentes painéis de partículas possíveis diferenciados pelas matérias-primas, com o propósito de servir como uma estratégia ambiental na escolha de matérias-primas que apresentem menores impactos ambientais para a manufatura de determinado produto.

4.2 INTERPRETAÇÃO, DISCUSSÃO E CONCLUSÕES DO ESTUDO

Os resultados que foram obtidos da fase de AICV foram tratados e posteriormente, transformados em gráficos para que a interpretação possa ser mais clara e transparente. Os gráficos comparam os resultados para as diferentes categorias de impacto do método ReCiPe para os 5 painéis estudados.

Para a interpretação dos resultados foram resgatados os objetivos iniciais, bem como o escopo, todas as suposições e limitações definidas, de forma a obter conclusões coerentes de acordo com as considerações feitas anteriormente. Foram realizadas as verificações de consistência e completeza para garantir a confiabilidade dos resultados.

Na interpretação desta pesquisa, será considerada a comparabilidade dos resultados dos 5 painéis MDP por categorias de impacto, buscando os painéis que apresentem menores impactos ambientais potenciais e qual a etapa produtiva de cada painel é responsável por manifestar o maior impacto ambiental potencial.

Finalmente, a fase de interpretação apresenta conclusões vinculadas aos painéis e fases produtivas, bem como recomendações de matérias-primas que demonstrem menores impactos

ambientais, buscando propor a ACV como uma técnica estratégica para escolha de matérias-primas mais sustentáveis.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 PROPRIEDADES FÍSICAS DOS PAINÉIS 2 E 4

Conforme descrito anteriormente, não foram encontrados na literatura estudos com as formulações dos painéis 2 e 4, com densidade dentro da faixa de 630 – 680 kg/m³ e espessura nominal de 15 mm e dessa forma, esses painéis foram produzidos em laboratório. As propriedades físicas aferidas nos painéis 2 (partículas de BCA e resina PU de mamona) e 4 (partículas de BCA e eucalipto e resina PU de mamona) foram: densidade aparente e inchamento 24 horas, ambos apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 - Propriedades físicas referentes aos painéis 2 e 4

Propriedades	Densidade Aparente (kg/m ³)			Inchamento 24 horas (%)		
	Real*	NBR14810	ANSI 208.1	Real*	NBR14810	ANSI 208.1
Painel 2	667	551 - 750	640 - 800	17,7	≤ 22	NA**
Painel 4	659			21,2		

Real* refere-se aos valores aferidos nos corpos de prova.

NA** significa não se aplica.

Fonte: Própria autoria.

Ambos os painéis obtiveram densidade dentro do padrão estipulado pelas normas NBR 14810 (ABNT, 2013) e ANSI 2018. 1 (ANSI, 1999) e podem ser considerados painéis de partículas de média densidade (MDP). Em relação ao ensaio de inchamento após 24 horas, tanto o Painel 2 quanto o Painel 4 também atenderam à norma.

Dessa forma, de acordo apenas com as propriedades físicas, os painéis 2 e 4 produzidos em laboratório atendem às normas NBR 14810 e ANSI 2018. 1, podendo ser comparados aos painéis comerciais e aos indicados na revisão bibliográfica, ilustrados pela Figura 14.

5.2 PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS PAINÉIS 2 E 4

As propriedades mecânicas aferidas nos painéis 2 (partículas de BCA e resina PU de mamona) e 4 (partículas de BCA e eucalipto e resina PU de mamona) foram: resistência à flexão

estática, módulo de elasticidade e resistência à tração perpendicular. Os resultados estão exibidos na Tabela 10.

Tabela 10 - Propriedades mecânicas referentes aos painéis 2 e 4

Propriedades / Painéis		Painel 2	Painel 4
Resistência à tração perpendicular (MPa)	Real*	0,63	0,66
	Desv. Padrão	0,29	0,25
	NBR14810	≥ 0,35	
	ANSI 208.1	≥ 0,40	
Resistência à flexão estática (MPa)	Real*	23,64	9,54
	Desv. Padrão	3,69	1,96
	NBR14810	≥ 11	
	ANSI 208.1	≥ 11	
Módulo de elasticidade (MPa)	Real*	2163	1107
	Desv. Padrão	267	216
	NBR14810	≥ 1600	
	ANSI 208.1	≥ 1725	

Fonte: Própria autoria.

O Painel 2, produzido com BCA e PU de mamona, atendeu ambas as normas citadas na Tabela 10, que citam requisitos para padrões comerciais, produzidos com madeira. O painel 4, fabricado com BCA + eucalipto e PU de mamona atendeu apenas à Resistência a tração perpendicular. Para prosseguir com o estudo, nenhuma formulação foi descartada para aplicação de ACV nos sistemas produtivos.

5.3 ACV COMPARATIVA

Os resultados da ACV comparativa dos cinco diferentes painéis de partículas serão apresentados primeiramente de forma geral, comparando os resultados de cada categoria de impacto para as diferentes formulações. A Tabela 11 apresenta os resultados da AICV em nível *midpoint* pela metodologia ReCiPe e os potenciais impactos ambientais para as 18 categorias de impacto estão apresentadas a seguir.

Tabela 11 - Resultados da AICV em nível *midpoint* pela metodologia ReCiPe 2008

Categorias de Impacto	Abreviação	Unidade	Painel 1	Painel 2	Painel 3	Painel 4	Painel 5
Mudanças climáticas	MC	kg CO ₂ -Equiv.	249,0	153,8	262,1	159,2	314,7
Esgotamento de recursos fósseis	ERF	kg petróleo eq.	125,0	41,9	124,7	39,7	151,9
Toxicidade humana	TH	kg 1,4-DB eq	28,7	22,6	27,5	21,4	29,5
Radiação Ionizante	RI	kg U235 eq	8,9	18,7	8,8	18,1	10,8
Depleção de metais	DM	kg Fe eq	17,5	9,6	17,2	9,0	22,3
Depleção de ozônio	DO	kg CFC-11 eq	3,71E-05	1,72E-05	3,73E-05	1,64E-05	4,45E-05
Formação de partículas	FP	kg PM10 eq	0,640	0,606	0,656	0,598	0,708
Formação de oxidantes químicos	FOQ	kg NMVOC	1,83	1,95	1,85	1,87	1,75
Ocupação de solo agrícola	OSA	m ² a	41,5	41,2	198,7	192,4	205,7
Transformação de solo natural	TSN	m ²	0,109	0,096	27,1	26,1	30,7
Ocupação de solo urbano	OSU	m ² a	2,02	1,40	2,03	1,32	2,24
Acidificação terrestre	AT	kg SO ₂ eq	2,38	2,48	2,41	2,46	2,57
Ecotoxicidade terrestre	ET	kg 1,4-DB eq	0,087	0,083	0,056	0,052	0,029
Ecotoxicidade em água doce	ECAD	kg 1,4-DB eq	0,421	0,209	0,357	0,140	0,374
Eutrofização em água doce	EAD	kg P eq	0,003	0,018	0,003	0,016	0,002
Ecotoxicidade marinha	ECM	kg 1,4-DB eq	0,291	0,084	0,280	0,068	0,347
Eutrofização marinha	EM	kg N-Equiv.	0,267	0,652	0,314	0,659	0,330
Esgotamento de água	EA	m ³	1330	2318	1322	2272	1500

As células da tabela preenchidas em verde representam o painel com melhor desempenho ambiental para a categoria e as células preenchidas em laranja apresentam o painel com desempenho ambiental inferior.

Fonte: Própria autoria.

Para um entendimento geral dos resultados, é importante relembrar as formulações de cada painel para que seja possível uma comparação transparente entre eles e uma correlação

entre as matérias-primas e os impactos ambientais referentes. Dessa forma, segue na Figura 20 as principais matérias primas utilizadas na produção dos painéis.

Figura 20 - Principais matérias-primas de cada painel de partículas estudado

Fonte: Própria autoria.

Para a categoria de Mudanças Climáticas (MC) nota-se que o painel com maior impacto ambiental é o convencional, ou seja, Painel 5, produzido com partículas de eucalipto e resina UF. O painel com menor emissão de CO₂ equivalente foi o Painel 2, produzido com ambas as matérias-primas alternativas exploradas, partículas de BCA e resina PU de mamona.

Ainda é possível perceber uma diferença na quantidade de emissões de CO₂ eq. entre os painéis com uso da resina UF (painéis 1, 3 e 5) que oscila entre 91,6 e 165,5 kg de CO₂ eq. a mais do que os painéis que utilizam a resina PU de mamona (painéis 2 e 4). Dessa forma, o uso de partículas de BCA e resina PU de mamona para produção de painel MDP emitem menor quantidade de CO₂ equivalente.

Os resultados da categoria de Esgotamento de Recursos Fósseis (ERF) se assemelham às discussões da categoria MC, visto que a formulação que utiliza maior quantidade de petróleo equivalente é o Painel 5 (convencional), juntamente com os produtos que utilizam a resina UF. Isso pode ser explicado pelo consumo de gás natural e carvão mineral (recursos fósseis) gastos para a produção da ureia e metanol, utilizados na produção da resina UF.

Para as seis categorias de impacto: Esgotamento de Recursos Fósseis (ERF), Toxicidade Humana (TH), Depleção de Metais (DM), Depleção de Ozônio (DO), Formação de Partículas (FP) e Ocupação de Solo Urbano (OSU), a formulação de painel apresentada com maior potencial de impacto é o Painei 5 (considerado MDP convencional) e o painel com menor potencial de impacto é o Painei 4, o qual mistura BCA e eucalipto com a resina PU de mamona.

Observando os resultados da categoria de Ocupação de Solo Agrícola (OSA), o Painei 5 apresentou os maiores impactos ambientais. Esse resultado está relacionado principalmente à produção das matérias-primas utilizadas como partículas. O painel 5 é o único que utiliza apenas eucalipto, cultura que apresenta maior produtividade em menor área quando comparado a cana-de-açúcar, porém o eucalipto leva no mínimo 6,5 anos para ser colhido.

Dentre as cinco categorias de impacto relacionadas ao solo, Ocupação de Solo Agrícola (OSA), Transformação de Solo Natural (TSN), Ocupação de Solo Urbano (OSU), Acidificação Terrestre (AT) e Ecotoxicidade Terrestre (ET), nas quatro primeiras o painel com maior impacto potencial é o Painei 5, MDP convencional. Para ET, os painéis com maiores potenciais de impacto foram os que utilizaram apenas partículas de BCA, principalmente devido à quantidade de agrotóxicos utilizados em sua fase agrícola.

Para as categorias referentes a água doce, Ecotoxicidade em Água Doce (ECAD) e Eutrofização em Água Doce (EAD), os painéis com maiores potenciais de impacto foram os que utilizaram apenas partículas de BCA também, devido às emissões de agrotóxicos e fertilizantes que podem chegar lençóis freáticos, rios e lagos.

Dentro da categoria de Ecotoxicidade em Água Doce (ECAD) o painel que apresentou os maiores impactos foi o Painei 1, que utiliza partículas de BCA e resina UF. Quando comparado ao Painei 2 (BCA e resina PU), valor de impacto decresce em torno de 51 %, ressaltando o impacto ambiental da produção da resina UF para a categoria ECAD, devido às emissões de formaldeído em sua manufatura.

Para as categorias relacionadas à água marinha, vale ressaltar que o escopo geográfico pode interferir no potencial de impacto, visto que no caso deste estudo o escopo geográfico está situado no interior do estado de São Paulo, apresentando pouca interferência nos resultados desta dissertação. Caso o estudo possua o escopo geográfico delimitado próximo a biomas marinhos, as categorias ECM e EM podem apresentar impactos potenciais nessas regiões.

Posteriormente, nos subitens seguintes, os resultados serão discriminados para cada categoria de impacto (CI), com o intuito de explorar os *hostpots* dentro de cada sistema de produto em cada CI e o item 5.3.19 apresenta as considerações finais sintetizando os resultados apresentados.

5.3.1 MUDANÇAS CLIMÁTICAS (MC)

Neste tópico estão apresentados os resultados de impactos ambientais potenciais para MC dentro dos sistemas de produto dos cinco painéis estudados discriminado em processos, que podem ser observados na Figura 21. A tabela com os resultados em kg de CO₂ equivalentes, ou seja, uma forma de representação de gases de efeito estufa (GEE) em uma única unidade, pode ser consultada no apêndice A.

Como citado anteriormente, os painéis que apresentam maior impacto ambiental para MC são os que contêm a resina UF em sua formulação, graças às emissões durante sua produção, principalmente devido ao composto formaldeído. O painel estudado com maior potencial de impacto para essa categoria foi o Painel 5.

Silva et al. (2013), apresentaram com a metodologia CML 2001 a categoria de impacto de Aquecimento Global o valor de 333,28 kg CO₂ equivalentes para a produção de 1m³ de painel MDP convencional de eucalipto e resina UF, o equivalente ao Painel 5. O resultado obtido nessa pesquisa foi próximo ao obtido pelos autores, sendo obtido o valor de 314,7 kg de CO₂ equivalentes de emissões com a metodologia ReCiPe.

Para os Painéis 2 e 4, produzidos com resina PU de mamona, o maior *hostpot* é o mix energético, que também é o segundo maior impacto para o restante dos painéis. Esse resultado é devido ao consumo de recursos não renováveis para a produção da eletricidade, como carvão mineral e petróleo, que acarreta emissões de equivalentes de CO₂.

Figura 21 - Análise de contribuição de impactos para a categoria MC

Fonte: Própria autoria.

Além disso, observando os valores de impactos ambientais potenciais relacionados ao *mix* energético são mais elevados nos painéis 2 e 4 em kg de CO₂ equivalentes devido ao maior consumo de eletricidade para a produção da resina PU de mamona.

5.3.2 ESGOTAMENTO DE RECURSOS FÓSSEIS (ERF)

Neste item estão expostos os resultados de impactos ambientais potenciais para a categoria ERF, dentro dos sistemas de produto dos cinco painéis estudados discriminados em processos. A Figura 22 apresenta um gráfico de barras com o percentual de impacto relativo a cada processo envolvido na produção dos painéis e a tabela com os resultados em kg de petróleo equivalente podem ser encontrados no apêndice A.

Os resultados do ERF mostram valores totais discrepantes entre as formulações que utilizaram resina UF e as que utilizaram a resina PU de mamona. Para essa categoria, os painéis 1, 3 e 5 têm o maior impacto ambiental potencial, os quais incluíram resina UF.

Enquanto os painéis 2 e 4, que contêm resina PU de óleo de mamona, expressam o menor potencial de impacto. Isso pode ser explicado pelo consumo de recursos de combustíveis fósseis para a produção de resina UF, que é formada pela polimerização de ureia e formol.

Figura 22 - Análise de contribuição de impactos para a categoria ERF

Fonte: Própria autoria.

Analizando a Figura 22, a eletricidade é o maior *hotspot* para os painéis 2 e 4, que utilizaram resina PU de mamona em sua composição. Para a produção de 1 kg de resina ureia formaldeído, durante todo o processo de obtenção de matéria-prima para o adesivo, é necessário 4 MJ e para produzir a mesma quantidade de resina PU de mamona são utilizados 14 MJ.

O segundo maior *hotspot* para ambos os painéis é a fase de produção de MDP, devido principalmente ao óleo pesado utilizado para aquecer a prensa contínua na manufatura dos painéis. Silva (2012) analisa cenários para substituição do óleo pesado para aquecimento da prensa e o melhor cenário sugere a substituição por queima de resíduos de madeira, que já se encontram disponíveis no ambiente fabril.

5.3.3 TOXICIDADE HUMANA (TH)

Neste subitem estão apresentados os resultados de impactos ambientais potenciais para TH dentro dos sistemas de produto dos cinco painéis estudados detalhados por processos. A Figura 23 mostra os resultados percentuais das contribuições de cada processo envolvido.

A tabela com os resultados em kg de substâncias equivalentes ao 1,4 diclorobenzeno, substância que pode ser utilizada como pesticida, por exemplo, e é considerada cancerígena pela Agência Internacional de Pesquisa em Câncer (IARC), pode ser visualizada no apêndice A.

A partir da Figura 23, o maior *hotspot* na categoria TH para ambos os painéis é a fase de produção do painel MDP, principalmente devido às emissões envolvidas durante a produção dos painéis MDP.

O segundo maior *hotspot* para os painéis 1, 3 e 5 é a produção da resina UF, devido às emissões de formaldeído envolvidas em sua fabricação. Para os painéis 2 e 4, o segundo maior *hotspot* é a produção da resina PU de mamona, devido as emissões envolvidas em sua fabricação, principalmente na fabricação do isocianato.

Figura 23 - Análise de contribuição de impactos para a categoria TH

Fonte: Própria autoria.

Dentre os cinco painéis estudados, o Painel 4 foi o que apresentou o menor impacto ambiental na categoria TH, enquanto o MDP com maior impacto ambiental foi o Painel 5, que representa o painel comercial.

5.3.4 RADIAÇÃO IONIZANTE (RI)

Neste item são explorados os resultados de impactos ambientais potenciais para a categoria RI, dentro dos sistemas de produto dos cinco painéis estudados discriminados em processos. A Figura 24 apresenta um gráfico de barras com o percentual de impacto relativo a cada processo envolvido na produção dos painéis e a tabela com os resultados em kg de urânio, equivalente ao isótopo U-235, está apresentada no apêndice A.

Dentre os cinco painéis estudados, o painel com maior impacto ambiental para RI foi o Painel 2, com utilização das matérias-primas alternativas BCA e resina PU de mamona. O impacto referente à produção da resina PU de mamona para essa categoria é maior que o dobro do impacto relativo a resina UF. Isso pode ser explicado pelas emissões envolvidas na fabricação da resina, principalmente do isocianato, pré-polímero componente da resina à base de óleo de mamona.

Figura 24 - Análise de contribuição de impactos para a categoria RI

Fonte: Própria autoria.

Ainda assim, os valores mais discrepantes foram relativos ao *mix* energético, visto que a produção da resina PU de mamona envolve um gasto energético relativamente maior do que para a produção da resina à base de formaldeído.

5.3.5 DEPLEÇÃO DE METAIS (DM)

Neste subitem estão apresentados os resultados de impactos ambientais potenciais para DM dentro dos sistemas de produto dos cinco painéis estudados detalhados por processos. A Figura 25 mostra os resultados percentuais e a tabela com os resultados em kg de substâncias equivalentes ao ferro pode ser visualizada no apêndice A.

Dentre os cinco painéis estudados, os painéis com utilização da resina UF apresentam os maiores impactos ambientais para a categoria DM, e o Painel 5 é que indica menor desempenho ambiental. Esse resultado é referente às entradas não renováveis e ferrosas no ICV da resina UF, que pode ser visualizado no anexo C.

Figura 25 - Análise de contribuição de impactos para a categoria DM

Fonte: Própria autoria.

O maior *hotspot* para os painéis 2 e 4, nessa categoria de impacto, é a produção da resina à base de óleo de mamona, devido às entradas equivalentes ao ferro utilizadas em sua produção, como argila e silicato de alumínio, entradas do ICV que podem ser observadas no anexo D.

5.3.6 DEPLEÇÃO DE OZÔNIO (DO)

Neste subitem estão apresentados os resultados de impactos ambientais potenciais para DO dentro dos sistemas de produto dos cinco painéis estudados detalhados por processos. A Figura 26 mostra os resultados percentuais de contribuição de impacto e a tabela que apresenta os resultados em kg de substâncias equivalentes CFC-11 está no apêndice A.

O maior *hotspot* para essa categoria nos painéis 1, 3 e 5 é a produção da resina UF, sendo o Painel 5, considerado comercial, o painel com menor performance ambiental dentre os estudados. O Painel 4 apresenta a melhor performance ambiental dentre os estudados.

Figura 26 - Análise de contribuição de impactos para a categoria DO

Fonte: Própria autoria.

Para os painéis 2 e 4 o maior *hotspot* foi a produção de MDP, principalmente devido às emissões oriundas da queima do óleo pesado utilizado para aquecimento da prensa contínua. Como citado anteriormente em ERF, a sugestão é a substituição do óleo pesado por outra fonte de aquecimento que apresente menor impacto ambiental, como resíduos de madeira, citado por Silva (2012).

5.3.7 FORMAÇÃO DE PARTÍCULAS (FP)

Neste subitem estão apresentados os resultados de impactos ambientais potenciais para FP dentro dos sistemas de produto dos cinco painéis estudados detalhados por processos. A Figura 27 mostra os resultados percentuais das contribuições de impacto.

No apêndice A, são apresentados os resultados em kg de substâncias equivalentes ao PM10 (partículas inaláveis, de diâmetro inferior a 10 micrômetros (μm), elemento de poluição atmosférica).

Dentre os painéis estudados, os painéis com uso da resina UF apresentam os desempenhos ambientais inferiores, sendo o Painel 5, correspondente ao painel MDP convencional, o painel com maiores impactos ambientais.

Figura 27 - Análise de contribuição de impactos para a categoria FP

Fonte: Própria autoria.

Além da resina UF, a fase de produção dos painéis MDP é um considerado um *hostpot*, para ambos os painéis, devido às partículas formadas e emitidas ao ar durante o processo produtivo de manufatura dos painéis.

5.3.8 FORMAÇÃO DE OXIDANTES QUÍMICOS (FOQ)

Neste item são explorados os resultados de impactos ambientais potenciais para a categoria FOQ, dentro dos sistemas de produto dos cinco painéis estudados discriminados em processos. A Figura 28 mostra os resultados percentuais da contribuição dos impactos e a tabela que apresenta os resultados em kg de substâncias equivalentes NMVOC (compostos voláteis de carbono, não metano), está exibida no apêndice A.

Dentre os cinco painéis estudados, os painéis com uso da resina PU de mamona apresentaram os maiores impactos ambientais para essa categoria de impacto, principalmente devido às emissões de compostos voláteis durante a produção do isocianato, pré-polímero utilizado como componente do adesivo à base de óleo de mamona.

Figura 28 - Análise de contribuição de impactos para a categoria FOQ

Fonte: Própria autoria.

Ainda assim, a diferença entre o painel com maior (Painel 2) e menor potencial de impacto ambiental (Painel 5) é de apenas 0,199 kg de substâncias equivalentes NMVOC, sendo que os painéis apresentaram valores próximos uns dos outros.

Para essa categoria, a produção de BCA apresentou mais do que o dobro do impacto gerado na produção do eucalipto, devido à quantidade de agrotóxicos e fertilizantes utilizados na produção agrícola da cana-de-açúcar.

O maior *hostpot* para todos os painéis dentro dessa categoria de impacto é a fase de produção do painel MDP devido às emissões envolvidas na etapa de prensagem das partículas com a resina a elevadas temperaturas.

5.3.9 OCUPAÇÃO DE SOLO AGRÍCOLA (OSA)

Neste subitem estão apresentados os resultados de impactos ambientais potenciais para OSA dentro dos sistemas de produto dos cinco painéis estudados detalhados por processos. A Figura 29 mostra os resultados percentuais das contribuições de impacto e no apêndice A, os resultados em m² x ano, ou seja, a quantidade em m² de terra agrícola ocupada por ano estão apresentados em tabela.

Para essa categoria de impacto, os painéis que utilizam partículas de eucalipto apresentam os maiores potenciais de impacto, sendo que o Painel 5, MDP convencional, apresenta o maior impacto ambiental potencial, com valor de 205,7 m² x ano ocupados para a produção de 1 m³ de painel MDP.

O painel com menor potencial de impacto para essa categoria é o Painei 2, com valor de 41,2 m² x ano de solo agrícola ocupado com cana-de-açúcar para a produção de 1 m³ de painei MDP com BCA. Os valores dos impactos ambientais potenciais entre os painéis 1 e 2 são próximos, variando entre 0,3 m² x ano.

Figura 29 - Análise de contribuição de impactos para a categoria OSA

Fonte: Própria autoria.

Para produção de 1 m³ de painei de partículas a uma densidade média de 650 kg/m³, são necessários 650 kg de partículas e resina. Considerando 10 % de resina, são utilizados 585 kg de partículas. Considerando partículas de BCA, são necessários 2.089 kg de cana-de-açúcar para produção de 585 kg de BCA, desconsiderando perdas, o que significa 278 m² de solo agrícola ocupado.

Para partículas de eucalipto, com densidade adotada segundo Silva (2012) de 474 kg/m³, é necessário 1,23 m³ de árvores plantadas, ou seja, aproximadamente 52 m² de solo agrícola ocupado, entretanto o eucalipto necessita de no mínimo 6,5 anos para ser colhido, fato que explica a influência dos impactos ambientais potenciais associados a ele.

5.3.10 TRANSFORMAÇÃO DE SOLO NATURAL (TSN)

Neste item são explorados os resultados de impactos ambientais potenciais para a categoria TSN, dentro dos sistemas de produto dos cinco painéis estudados discriminados em processos. A Figura 30 apresenta os resultados percentuais de contribuição de impacto e no apêndice A são apresentados os resultados em metros quadrados.

Dentre os painéis estudados, os painéis com uso de eucalipto apresentaram maiores valores de impacto ambiental referente a categoria TSN. Apesar de essa categoria ser apresentada em metros quadrados, segundo GOEDKOOOP et al. (2009), a caracterização

midpoint da categoria TSN considera a quantidade de área transformada (m²) pelo tempo de ocupação em anos.

Figura 30 - Análise de contribuição de impactos para a categoria TSN

Fonte: Própria autoria.

O painel 5 é o único que utiliza apenas eucalipto, uma cultura que apresenta maior produtividade em menor área quando comparada à cana-de-açúcar. Por outro lado, o eucalipto pode ser colhido aos 6,5 anos e dessa forma, a transformação de solo natural é maior que a produção de cana-de-açúcar.

Para essa categoria de impacto o Painel 5, MDP convencional, possui o maior potencial de impacto ambiental e o Painel 2, produzido com BCA e resina PU de mamona, é o que possui menor potencial de impacto.

5.3.11 OCUPAÇÃO DE SOLO URBANO (OSU)

Neste subitem são explorados os resultados de impactos ambientais potenciais para a categoria EA, dentro dos sistemas de produto dos cinco painéis estudados discriminados em processos. A Figura 31 apresenta os resultados percentuais da contribuição de impacto e no apêndice A estão apresentados os valores para essa categoria em metros quadrados ao ano.

Nessa categoria de impacto os dois principais *hotspots* são o processo de produção de MDP, que se apresentou como maior impacto para ambos os painéis e a produção da resina UF. Para essa categoria de impacto, os painéis 1, 3 e 5, que utilizaram a resina UF apresentaram os maiores potenciais de impacto.

Figura 31 - Análise de contribuição de impactos para a categoria OSU

Fonte: Própria autoria.

A produção da resina PU de mamona, por sua vez, apresentou menor valor para OSU quando comparado a resina UF, pois parte de seu processo produtivo ocorre em solo agrícola, para produção da mamona.

Pode-se notar também que a produção do BCA apresentou valores de OSU, enquanto a produção do eucalipto não. Isso deve-se ao fato de que para a produção do eucalipto as etapas produtivas foram desenvolvidas apenas em solo agrícola, enquanto para a produção do BCA, é necessário a etapa de processamento dentro de uma indústria sucroalcooleira.

5.3.12 ACIDIFICAÇÃO TERRESTRE (AT)

Os resultados de impactos ambientais potenciais para a categoria AT são apresentados percentualmente pela Figura 32 e a tabela com os resultados em kg de SO₂ equivalentes pode ser encontrada no apêndice A.

Figura 32 - Análise de contribuição de impactos para a categoria AT

Fonte: Própria autoria.

Para essa categoria de impacto o maior *hotspot* é o processo de produção de MDP, principalmente devido às emissões descritas no ICV da fábrica de painel MDP, apresentada no anexo J. Há emissão direta de dióxido de enxofre ao ar, que pode se precipitar e contaminar o solo por meio de chuva ácida.

O segundo maior *hotspot* para essa categoria é a produção dos adesivos, visto que ambas as resinas apresentam valores de impacto similares, apesar de a resina UF ter potencial de impacto superior, as variações são em torno de 0,030 kg de SO₂ equivalente emitidos. Em ambos os ICVs há emissões de dióxido de enxofre.

5.3.13 ECOTOXICIDADE TERRESTRE (ET)

Neste subitem são explorados os resultados de impactos ambientais potenciais para a categoria ET. A tabela que apresenta os resultados em kg de substâncias equivalentes ao 1,4 diclorobenzeno se encontra no apêndice A e a Figura 33 apresenta os resultados percentuais.

Para essa categoria de impacto, os painéis que utilizaram partículas de BCA em sua formulação apresentaram o menor desempenho ambiental, principalmente devido aos pesticidas em grande quantidade utilizados na fase agrícola da produção da cana-de-açúcar. O Paine 1, seguido do Paine 2, são os que possuem maior potencial de impacto.

Figura 33 - Análise de contribuição de impactos para a categoria ET

Fonte: Própria autoria.

Para Ecotoxicidade Terrestre (ET), o Paine 5, MDP convencional, apresentou o menor potencial de impacto ambiental. Os maiores *hostspots* na produção do Paine 5 são a produção da resina UF e o processo produtivo de produção de MDP, devido às emissões envolvidas que podem ser depositadas em solo e contaminá-lo.

5.3.14 ECOTOXICIDADE EM ÁGUA DOCE (ECAD)

Os resultados de impactos ambientais potenciais para ECAD expressos em kg de substâncias equivalentes ao 1,4 diclorobenzeno estão apresentados em tabela no apêndice A.

A partir da Figura 34, o maior *hotspot* para os painéis 1, 3 e 5 é a produção da resina UF, principalmente devido às emissões de formaldeído durante a fase produtiva do adesivo que são descartados e podem promover contaminações em água doce. Os painéis que utilizaram a resina UF em sua formulação também apresentaram os maiores potenciais de impacto dentre os cinco estudados.

Figura 34 - Análise de contribuição de impactos para a categoria ECAD

Fonte: Própria autoria.

Os maiores impactos em ECAD para a produção da cana-de-açúcar estão vinculados ao consumo de agrotóxicos como glifosato, 2,4-D, atrazina, aldrin e linuron que liberam emissões para água doce. No caso da produção do eucalipto, os agrotóxicos finopril e glifosato são os principais responsáveis pela toxicidade em água doce. Entre as duas matérias-primas estudadas para produção das partículas, a produção da cana-de-açúcar produz maior impacto para ECAD.

Para os painéis 2 e 4, que têm em sua composição a resina PU de mamona, o maior *hotspot* foi a produção de bagaço de cana, principalmente pela grande quantidade de pesticidas utilizados na produção agrícola da cana-de-açúcar. Para o painel 1 e 3, o segundo maior *hotspot* também é a produção das partículas de BCA.

5.3.15 EUTROFIZAÇÃO EM ÁGUA DOCE (EAD)

Neste item são explorados os resultados de impactos ambientais potenciais para a categoria EAD. A tabela com os resultados em kg de fósforo equivalente está apresentada no apêndice A e a Figura 35 apresenta um gráfico com o resultado percentual de contribuição de impacto.

Para essa categoria de impacto o Painei 1 apresentou a formulação com maior potencial de impacto, principalmente devido às emissões referentes aos fertilizantes utilizados na produção da cana-de-açúcar, que depositados em água doce podem causar eutrofização do local.

Figura 35 - Análise de contribuição de impactos para a categoria EAD

Fonte: Própria autoria.

A Figura 35 apresenta os principais *hotspots* para os painéis estudados. Os painéis 2 e 4, com a utilização de resina PU de mamona, são os que apresentam os menores potenciais de impacto ambiental para essa categoria, enquanto os painéis 1, 3 e 5 são os que possuem maior potencial de impacto.

Ambas as resinas também têm grande contribuição para essa categoria de impacto, devido principalmente aos resíduos de sua produção depositados em água doce, que podem causar eutrofização.

5.3.16 ECOTOXICIDADE MARINHA (ECM)

Os resultados de impactos ambientais potenciais para ECM estão apresentados na Figura 36 percentualmente. A tabela que apresenta os resultados em kg de substâncias equivalentes ao 1,4 diclorobenzeno pode ser observada no apêndice A.

Para a categoria de impacto ECM, o painel com maior impacto ambiental durante sua produção é o Painei 5. Os painéis com utilização de resina UF apresentam maior impacto ambiental quando comparados aos painéis 2 e 4, que utilizam a resina PU de mamona.

Figura 36 - Análise de contribuição de impactos para a categoria ECM

Fonte: Própria autoria.

Para a Ecotoxicidade marinha (ECM), a produção da resina UF é o maior *hotspot* devido às emissões de formaldeído envolvidas em sua fabricação. Para os painéis 2 e 4, o maior *hotspot* é o *mix* energético, porém os valores em kg 1,4-DB eq. são bem discrepantes com relação aos painéis que utilizam resina UF em sua composição.

Para esse estudo, o escopo geográfico não está localizado próximo a biomas marinhos, logo essa categoria tem pouca interferência nos resultados. Entretanto se o estudo for delimitado em regiões próximas a costa, essa categoria deve ser considerada como potencial de impacto, principalmente para painéis que utilizem resina UF em sua fabricação.

5.3.17 EUTROFIZAÇÃO MARINHA (EM)

Os resultados de impactos ambientais potenciais para EM estão apresentados na Figura 37 percentualmente, enquanto a tabela que expressa esses resultados em kg de nitrogênio equivalentes está no apêndice A.

Para essa categoria de impacto, os painéis que utilizaram a resina PU de mamona em sua formulação apresentaram os maiores potenciais de impacto, diferentemente da categoria de eutrofização em água doce (EAD), na qual o maior *hotspot* foi a produção do BCA.

Figura 37 - Análise de contribuição de impactos para a categoria EM

Fonte: Própria autoria.

Isso pode ser explicado por uma saída do ICV da resina PU de mamona relacionada a emissões nitrogenadas em água marinha, que pode ser observada no anexo D. Entretanto, como foi citado na categoria ECM, neste estudo o escopo geográfico não se encontra próximo a bioma marinho e assim, o resultado desta categoria não tem interferência no resultado geral da ACV nesta pesquisa.

5.3.18 ESGOTAMENTO DE ÁGUA (EA)

Neste subitem são explorados os resultados de impactos ambientais potenciais para a categoria EA. A tabela que apresenta os resultados em metros cúbicos está apresentada no apêndice A e a Figura 38 apresenta os resultados percentuais.

Para essa categoria de impacto, os painéis que apresentaram maior potencial de impacto ambiental foram os painéis 2 e 4, que utilizaram a resina PU de mamona. Entretanto o maior *hotspot* para essa CI foi o *mix* energético brasileiro.

Isso pode ser explicado pelo elevado gasto energético para a produção da resina PU de mamona. Como a matriz energética brasileira é baseada 66,6 % em fonte hidráulica, quanto maior o gasto de eletricidade nos processos, maior o seu potencial de impacto para a categoria EA, devido ao consumo de água utilizada para geração de energia.

Figura 38 - Análise de contribuição de impactos para a categoria

Fonte: Própria autoria

Ainda assim, a fonte hidráulica é considerada renovável, e apesar de causar um alto potencial de impacto na categoria EA, diferentemente de países onde a principal fonte é nuclear ou térmica, tem menor interferência em categorias de impacto relacionadas a toxicidade de água, solo ou humana.

5.3.19 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Após a apresentação detalhada de cada categoria de impacto e a contribuição de cada matéria-prima e processo dentro do sistema de produto estudado, este subitem expõe uma síntese dos resultados da ACV aplicada nas cinco formulações.

A partir dos resultados apresentados, nota-se que a formulação do Painel 5, identificado como o painel MDP convencional, apresentou maior potencial de impacto ambiental para 11 das 18 categorias de impacto estudadas. O Painel 4, apresentado como uma mistura entre partículas de BCA e eucalipto e resina PU de mamona, exibiu o menor potencial de impacto para oito das 18 categorias do método ReCiPe.

Para as categorias de impacto relacionadas às emissões ao solo (OSA, TSN, OSU, AT e ET) o Painel 5 se apresentou como o painel de maior potencial de impacto, exceto para a categoria ET. Para as categorias OSA e TSN, o maior *hotspot* foi a produção do eucalipto, principalmente devido ao tempo de crescimento do mesmo. Para as categorias OSU e AT, o maior *hotspot* foi a produção da resina UF. Esses resultados podem ser observados no APÊNDICE A, Tabelas 20, 21, 22 e 23.

Para as categorias relacionadas às emissões à água (ECAD, EAD, ECM, EM e EA), o escopo geográfico deste estudo foi situado no interior do estado de São Paulo, não integrando

biomas marinhos e dessa forma, as categorias Ecotoxicidade Marinha (ECM) e Eutrofização Marinha (EM) não apresentaram potencial de impacto que interfira nos resultados desse estudo, podendo ser removidos na análise final. Todavia, deve-se tomar o cuidado de analisar o escopo geográfico do estudo.

As categorias Eutrofização em Água Doce (EAD) e Esgotamento de Água (EA) apresentaram a resina PU de mamona como principal *hotspot*. No caso da categoria EAD esse resultado é devido principalmente às emissões de fosfato, fósforo e fertilizantes durante a fase agrícola. Para a categoria de EA, o elevado consumo de eletricidade para a produção da resina PU de mamona (14MJ) quando comparado ao consumo para fabricação da resina UF, juntamente com a maior fonte da matriz energética brasileira ser hidroelétrica explicam esse resultado.

A produção do BCA teve grandes potenciais de impacto para as categorias Ecotoxicidade Terrestre (ET), Ecotoxicidade em Água Doce (ECAD) e Eutrofização em Água Doce (EAD), devido principalmente devido ao alto consumo de fertilizantes e agrotóxicos que acarretam emissões para água e solo.

A produção do eucalipto, por sua vez, apresentou grandes potenciais de impacto para as categorias de Ocupação de Solo Agrícola (OSA) e Transformação de Solo Natural (TSN), devido ao tempo envolvido em sua produção multiplicado pelo potencial de impacto de uso e transformação do solo.

O adesivo comercial, resina UF, citado em diversos estudos como o principal *hotspot* para a produção de painéis de madeira, foi o principal *hotspot* para oito das dezoito categorias de impacto estudadas, sendo elas: Mudanças Climáticas (MC), Esgotamento de Recursos Fósseis (ERF), Toxicidade Humana (TH), Depleção de Metais (DM), Depleção de Ozônio (DO), Formação de Partículas (FP), Ecotoxicidade em Água Doce (ECAD) e Ecotoxicidade Marinha (ECM).

O adesivo alternativo, resina PU de mamona, se apresentou como potencial de impacto para quatro categorias de impacto, sendo elas Radiação Ionizante (RI), Formação de Oxidantes Químicos (FOQ), Eutrofização em Água Doce (EAD) e Esgotamento de Água (EA). Para as outras categorias, seu potencial de impacto foi menor do que o apresentado pela resina UF.

A partir dos resultados apresentados, é possível comparar os o impacto das partículas e dos adesivos separadamente. O Paine 5, considerado o painel convencional, é produzido com partículas de eucalipto e resina UF e o Paine 1, produzido com partículas de BCA e resina UF. Assim, comparando o Paine 5 e o Paine 1, estamos comparando os impactos apenas das partículas, visto que o desempenho de ambos foi considerado igual.

Dessa forma, a alteração apenas das partículas (Paine 5 para Paine 1) não foi o suficiente para resultar nos menores impactos ambientais diante das cinco formulações. Entretanto, ao alterar as partículas e o adesivo, os potenciais impactos ambientais sofrem maiores reduções, como exemplo temos os impactos do Paine 2, o qual foi produzido com partículas de BCA e resina PU de mamona.

Para a categoria de Mudanças Climáticas (MC), por exemplo, na qual o Paine 5 apresentou o maior impacto de 314 kg de CO₂ equivalentes, alterando as partículas para BCA (Paine 1) houve uma redução de aproximadamente 21% no potencial de impacto. Ao alterar as partículas e o adesivo (Paine 2), houve uma redução de 51% no potencial de impacto.

Para as formulações de substituição parcial das partículas de eucalipto (Painéis 3 e 4), a alteração do adesivo convencional para a resina PU de mamona foi o responsável pela formulação de menor potencial de impacto, diante das 18 categorias estudadas. Isso porque o BCA também foi indicado como *hotspot* para algumas categorias, devido a quantidade de fertilizantes e agrotóxicos utilizados na fase agrícola da produção da cana-de-açúcar.

Diante de todos os resultados apresentados é importante se atentar aos conceitos da economia circular como parte da análise final dos resultados. Nesse estudo, a economia circular relaciona-se com o desenvolvimento de produtos, visto que a ACV é utilizada para escolha de uma matéria-prima que apresente o menor impacto ambiental, bem como a redução do uso de recursos não renováveis e o reuso de resíduos.

A ACV permitiu resultados robustos que podem ser aliados à economia circular para alcançar resultados consistentes, visto que apenas o conceito de circularidade sem aplicação de técnica de avaliação pode indicar resultados errôneos, como por exemplo uma ação de substituição total de partículas de eucalipto por partículas de BCA em uma fábrica de painel MDP, apenas por se utilizar do conceito de reuso, quando na verdade, com o uso da ACV foi possível indicar a substituição parcial como opção de menor impacto ambiental.

6. CONCLUSÕES

Nesse estudo o Painel 5, apontado como MDP convencional, apresentou o maior potencial de impacto para onze das dezoito categorias de impacto, principalmente devido às matérias-primas, ressaltando a necessidade de encontrar substitutos com menores impactos ambientais.

Dentre as formulações estudadas, a formulação de painel MDP que apresentou menor potencial de impacto para oito das dezoito CIs foi o Painel 4, que foi produzido com uma mistura entre partículas de BCA e eucalipto e resina PU de mamona.

Conforme foi citado nas considerações finais, a alteração apenas de partículas não foi o suficiente para apresentar a formulação com o menor potencial de impacto ambiental e, considerando os resultados deste estudo, a combinação de partículas de eucalipto e BCA indicou o menor impacto ambiental.

Dentre as resinas comparadas, é possível concluir que a resina UF apresentou o maior potencial de impacto, quando comparado à resina PU de mamona, para 14 das 18 categorias de impacto estudadas. A resina PU de mamona apresentou-se como o adesivo com o menor potencial de impacto para 14 categorias de impacto.

A partir desse estudo, foi possível concluir que a ACV se apresentou como uma eficiente ferramenta para escolha de matérias-primas com menores impactos ambientais e pode ser utilizada como técnica associada ao conceito de economia circular para desenvolvimento de novos produtos, bem como análise de sistemas de produto já existentes para busca por melhorias.

Este estudo foi focado no desempenho ambiental dos painéis e suas matérias-primas, entretanto recomenda-se para estudos futuros, pesquisas que engajem outros pilares da sustentabilidade, como os pilares econômico e social para que o termo “sustentável” possa ser aplicado aos novos materiais que estão sendo desenvolvidos com resíduos e coprodutos agroindustriais.

7. BIBLIOGRAFIA

- AGUILAR-REYNOSA, A. et al. Microwave heating processing as alternative of pretreatment in second-generation biorefinery: An overview. **Energy Conversion and Management**, v. 136, p. 50–65, 15 mar. 2017.
- AMOURI, M. et al. Sustainability assessment of *Ricinus communis* biodiesel using LCA Approach. **Clean Technologies and Environmental Policy**, v. 19, n. 3, p. 749–760, 13 abr. 2017.
- ANTUNES, F. A. F. et al. A novel process intensification strategy for second-generation ethanol production from sugarcane bagasse in fluidized bed reactor. **Renewable Energy**, v. 124, p. 189–196, 1 ago. 2018.
- AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE. **ANSI A208.1**:. Gaithersburg, 1993.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT, Rio de Janeiro. **NBR ISO 14040** – Gestão Ambiental – Avaliação do ciclo de vida: princípios e estrutura. Rio de Janeiro, 2009a.
- _____. **NBR ISO 14044** – Gestão ambiental – Avaliação de ciclo de vida: requisitos e orientações. Rio de Janeiro, 2009b.
- _____. **NBR14810** – Painéis de partículas de média densidade. Parte 1: Terminologia. Rio de Janeiro, 2013.
- _____. **NBR14810** – Painéis de partículas de média densidade. Parte 2: Requisitos e Métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 71 p., 2018.
- BALAT, M. Mechanisms of Thermochemical Biomass Conversion Processes. Part 1: Reactions of Pyrolysis. **Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects**, v. 30, n. 7, p. 620–635, 3 mar. 2008.
- 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**. 229 p. Tese (Doutorado). Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, Universidade de São Paulo. Pirassununga, 2015.

BARRERO, N. M. G. et al. Evaluation of mold growth on sugarcane bagasse particleboards in natural exposure and in accelerated test. **International Biodeterioration & Biodegradation**, v. 115, p. 266–276, 1 nov. 2016.

BARROS FILHO, R. M. et al. Hybrid chipboard panels based on sugarcane bagasse, urea formaldehyde and melamine formaldehyde resin. **Industrial Crops and Products**, v. 33, n. 2, p. 369–373, 2011.

BATTEGAZZORE, D. et al. Layer by Layer-functionalized rice husk particles: A novel and sustainable solution for particleboard production. **Materials Today Communications**, v. 13, p. 92–101, 1 dez. 2017.

BATTISTELLE, R. A. G.; MARCILIO, C.; LAHR, F. A. R. Emprego do bagaço da cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum*) e das folhas caulinares do bambu da espécie *Dendrocalamus giganteus* na produção de chapas de partículas. **Pesquisa e Tecnologia Minerva**, v. 5, n. 3, p. 297–305, 2009.

BATTISTELLE, R. A. G. et al. Physical and mechanical characterization of sugarcane bagasse particleboards for civil construction. **Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems**, v. 4, n. 4, p. 408–417, 2016.

BELINI, U. L. et al. Painel multicamada com reforço de partículas de bambu. **Scientia Forestalis/Forest Sciences**, v. 40, n. 103, p. 421–427, 2014.

BIAZUS, A.; HORA, A. B. DA;; LEITE, B. G. P. Panorama de Mercado: painéis de madeira. **BNDES Setorial**, n. 32, p. 49–89, 2010.

BUENO, C. **Avaliação de Ciclo de Vida na Construção Civil: Análise de Sensibilidade**. 266 p. Tese (Doutorado). Instituto de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

BUENO, S. B. **Chapas de partículas com resíduos lignocelulósicos e resina PU de mamona**. 91 p. Dissertação (Mestrado). Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, Universidade de São Paulo. Pirassununga, 2015.

CARVALHO, S. T. M. et al. Acoustic Characterization of Sugarcane Bagasse Particleboard Panels (*Saccharum officinarum* L). **Materials Research**, v. 18, n. 4, p. 821–827, ago. 2015.

CIANNAMEA, E. M. et al. Particleboard Based on Rice Husk: Effect of Binder Content and Processing Conditions. **Journal of Renewable Materials**, v. 5, n. 5, p. 357-362, 2017.

CORDEIRO, G. C.; TOLEDO FILHO, R. D.; FAIRBAIRN, E. M. R. Use of ultra-fine sugar cane bagasse ash as mineral admixture for concrete. **ACI materials journal**, v. 105, n. 5, p. 487, 2008.

CORDEIRO, G. C. et al. Long-Term Compressive Behavior of Concretes with Sugarcane Bagasse Ash as a Supplementary Cementitious Material. **Journal of Testing and Evaluation**, v. 46, n. 2, 2017.

CRAVO, J. C. **Painéis de partículas de saco de cimento e embalagem longa vida aplicados como forro em protótipo de aviários**. 160 p. Tese (Doutorado). Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, Universidade de São Paulo, Pirassununga, 2016.

CRAVO, J. C. M. **Compósito particulado de baixa densidade com casca de amendoim, fibra de coco verde e resina poliuretana à base de óleo de mamona para aplicação como forro de galpões avícolas**. 166 p. Dissertação (Mestrado). Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, Universidade de São Paulo, Pirassununga, 2013.

CRAVO, J. C. M. et al. Paineis aglomerados de resíduos agroindustriais. **Ciência Florestal**, v. 25, n. 3, p. 721-730, 2015.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. **Economia Circular – Diagrama Sistêmico**. Disponível em: <<https://www.ellenmacarthurfoundation.org/pt/economia-circular/diagrama-sistemico>> . Acesso em: 17 fev. 2020.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. **Towards the circular economy - Economic and Business Rationale for an Accelerated Transition**. Disponível em: <<https://m.vonederland.nl/system/files/media/towards-the-circular-economy.pdf>>. Acesso em: 8 out. 2018.

EMPRESA, DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanco Energético Nacional (BEN) 2018**: Ano base 2017. Rio de Janeiro: EPE, 2018.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 312**. Bruxelas, 1993.

EUROPEAN COMMISSION: JOINT RESEARCH CENTRE (EC-JRC). Institute for Environmental and Sustainability: **International Reference Life Cycle Data System (ILCD)**

Handbook – General Guideline for Life Cycle Assessment - Detailed guidance. Luxemburgo, 2010a.

_____. **International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook – Analysis of existing Environmental Impact Assessment Methodologies** for use in Life Cycle Assessment – Background document. Luxemburgo, 2010b.

EUROPEAN ENVIRONMENTAL AGENCY – EEA, Copenhagen. **Circular by design** – Products in the circular economy. 56 p. ISSN 1977-8449, doi:10.2800/860754, 2017.

FARRAPO, C. L. et al. Effect of Association of Sugarcane Bagasse with Eucalyptus Wood on the Quality of Particleboard. **Key Engineering Materials**, v. 668, p. 341–347, 2015.

FERNANDES, A. J. **Manual da cana-de-açúcar**. Livroceres, 1984.

FERRO, F. S. **Painéis de partículas orientadas (OSB) com insumos alternativos: viabilidade técnica e proposta de melhoria de desempenho ambiental**. Tese (Doutorado). 178 p. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017.

FIORELLI, J. et al. Sugarcane bagasse and castor oil polyurethane adhesive-based particulate composite. **Materials Research**, v. 16, n. 2, p. 439–446, 2013.

FIORELLI, J. et al. Painéis de partículas à base de bagaço de cana e resina de mamona – produção e propriedades. **Acta Scientiarum**. Technology, v. 33, n. 4, 20 set. 2011.

FONSECA, B. G. **Destoxificação biológica de hidrolisado hemicelulósico de bagaço de cana-de-açúcar empregando as leveduras *Issatchenkia occidentalis* e *Issatchenkia orientalis***. Dissertação (Mestrado). 110 p. Escola de Engenharia de Lorena, Universidade de São Paulo, Lorena, 2009.

Food and Agriculture Organization of the United Nations - FAO. **FAOSTAT, DATA, CROPS, SUGARCANE**. Disponível em:

<<http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC/visualize>>. Acesso em: 16 maio. 2018.

FUNES, R. H. **Avaliação do ciclo de vida e colagem de carbono proporciona a reciclagem de CO₂ em um sistema de produção de etanol de cana-de-açúcar**. 127 p. Tese (Doutorado). Escola de Artes, Ciências e Humanidades, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.

GALO, R. G. **Estudo da durabilidade de chapas de partículas multicamadas de bagaço de cana-de-açúcar e reforço localizado de fibras vegetais**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Biosistemas) - Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, Universidade de São Paulo. Pirassununga, 2015.

GAVA, M. et al. Production of Particleboards from Hevea brasiliensis Clones and Castor Oil-based Polyurethane Resin. **BioResources**, v. 10, n. 4, p. 6896-6905, 2015.

GOEDKOOPE, Mark et al. ReCiPe 2008. **A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level**, v. 1, p. 1-126, 2009.

HELLING, R. K.; RUSSELL, D. A. Use of life cycle assessment to characterize the environmental impacts of polyol production options. **Green Chemistry**, v. 11, n. 3, p. 380, 9 mar. 2009.

HIBBELER, R. C. **Resistência dos materiais**. 7.ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE PRODUTORES DE ÁRVORES - IBÁ. **Relatório anual 2017 ano base 2016**. Brasília: Disponível em: http://iba.org/images/shared/Biblioteca/IBA_RelatorioAnual2017.pdf, Acesso em: 18/09/18.

INSTITUTO BRASILEIRO DE INFORMAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA – IBICT. **Manual do Sistema ILCD: Sistema Internacional de Referência de dados do ciclo de vida de produtos e processos**. Brasília, 2014.

IRITANI, D. R. et al. Sustainable strategies analysis through Life Cycle Assessment: A case study in a furniture industry. **Journal of Cleaner Production**, v. 96, p. 308–318, 2015.

IWAKIRI, S. et al. Influência da massa específica sobre as propriedades mecânicas de painéis aglomerados. **FLORESTA**, v. 38, n. 3, 2008.

KHOSHNEVISAN, B. et al. Life cycle assessment of castor-based biorefinery: a well to wheel LCA. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 23, n. 9, p. 1788–1805, 21 set. 2018.

KIZINIEVIČ, O. et al. Eco-friendly fired clay brick manufactured with agricultural solid waste. **Archives of Civil and Mechanical Engineering**, v. 18, n. 4, p. 1156-1165, 2018.

KOUCHAKI-PENCHAH, Hamed et al. 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.

LAHR, A. F. R.; CHISTOFORO, A. L. **Painéis de partículas de madeira e de materiais lignocelulósicos**. São Carlos: EESC/USP, 2013.

LIMA, E. C. T. **Cana-energia como potencial fonte energética: caracterização dos subprodutos (frações sólida, líquida e gasosa) provenientes da pirólise**. 2016. 113f. Dissertação (mestrado). Universidade Estadual de Campinas, UNICAMP, Campinas, 2016.

MALONEY, T. M. **Modern particleboard and dry-process fiberboard manufacturing**. 689 p. 2.ed. São Francisco: M. Freeman, 1993.

MARTINS, E. H. et al. Soybean waste in particleboard production. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 42, n. 2, p. 186-194, 2018.

MENDES, R. F. et al. Use of Sugarcane Bagasse for Particleboard Production. **Key Engineering Materials**, v. 634, p. 163–171, 2014.

MENDES, R. F. et al. The adhesive effect on the properties of particleboards made from sugar cane bagasse generated in the distiller. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 32, n. 2, p. 209–218, 2009.

MENDES, L.; TREICHEL, M.; BELING, R. R. **Anuário Brasileiro da Silvicultura 2016**. Santa Cruz do Sul: Editora Gazeta Santa Cruz, 2016.

MESQUITA, R. G. A. et al. Urea Formaldehyde and Cellulose Nanocrystals Adhesive: Studies Applied to Sugarcane Bagasse Particleboards. **Journal of Polymers and the Environment**, v. 26, n. 7, p. 3040–3050, 2 jul. 2018.

MOKOMELE, T. et al. Ethanol production potential from AFEXTM and steam-exploded sugarcane residues for sugarcane biorefineries. **Biotechnology for Biofuels**, v. 11, n. 1, p. 127, 4 dez. 2018.

NAKANISHI, E. Y. **Estudo de biofilmes funcionais como revestimento em painéis multicamada para uso em instalação agroindustrial**. 186 p. Tese (Doutorado) - Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, Universidade de São Paulo, Pirassununga, 2018, 2018.

NAKANISHI, E. Y. et al. Study of the production process of 3-layer sugarcane-bamboo-based particleboards. **Construction and Building Materials**, v. 183, p. 618-625, 2018.

NONAKA, S.; UMEMURA, K.; KAWAI, S. Characterization of bagasse binderless particleboard manufactured in high-temperature range. **Journal of Wood Science**, v. 59, n. 1, p. 50–56, 18 fev. 2013.

OLIVEIRA, S. L. et al. Material Laminar inclusion. **Cerne**, v. 23, n. 2, p. 153–160, 2017.

OMETTO, A. R.; HAUSCHILD, M. Z.; ROMA, W. N. L. Lifecycle assessment of fuel ethanol from sugarcane in Brazil. **The international journal of life cycle assessment**, v. 14, n. 3, p. 236-247, 2009.

PEDROSA, A. L.; IWAKIRI, S.; MATOS, J. L. M. Produção de vigas estruturais em perfil “P” com painéis de madeira reconstituída de *Pinus taeda* L. e *Eucalyptus dunni* Maiden. **FLORESTA**, v. 35, n. 3, p. 7, 2005.

PRIETO-SANDOVAL, V.; JACA, C.; ORMAZABAL, M. Towards a consensus on the circular economy. **Journal of Cleaner Production**, v. 179, p. 605–615, 2018.

RIVELA, B. et al. LCI of Particleboard Wood and Other Renewable Resources 106 Life Cycle Inventory of Particleboard: A Case Study in the Wood Sector. **Int J LCA**, v. 11, n. 2, p. 106–113, 2006.

ROSSIGNOLO, J. A. et al. Improved interfacial transition zone between aggregate-cementitious matrix by addition sugarcane industrial ash. **Cement and Concrete Composites**, v. 80, p. 157-167, 2017.

SALLA, D. A. et al. Avaliação energética da produção de etanol utilizando como matéria-prima a cana-de-açúcar. **Ciência Rural**, v. 39, n. 8, 2009.

SANTOS, M. F. N. et al. Comparative study of the life cycle assessment of particleboards made of residues from sugarcane bagasse (*Saccharum* spp.) and pine wood shavings (*Pinus elliottii*). **Journal of Cleaner Production**, v. 64, p. 345-355, 2014.

SARTORI, D. L. **Painel Modular de chapas de partículas de bagaço de cana para fechamento lateral de instalação para bovinos**. 185 p. Tese (Doutorado). Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, Universidade de São Paulo, Pirassununga, 2015.

SARTORI, D. L. **Painel portante estrutural com chapa de partículas de bagaço de cana-de-açúcar e resina de mamona para centro de manejo bovino**. 131 p. Dissertação (Mestrado). Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, Universidade de São Paulo, Pirassununga, 2012.

SCHEEPENS, A. E.; VOGTLÄNDER, J. G.; BREZET, J. C. Two life cycle assessment (LCA) based methods to analyse and design complex (regional) circular economy systems. Case: Making water tourism more sustainable. **Journal of Cleaner Production**, v. 114, p. 257-268, 2016.

SILVA, D. A. L. et al. 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. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 19, n. 10, p. 1767–1778, 2014a.

SILVA, Diogo Aparecido Lopes et al. **Life cycle assessment of the sugarcane bagasse electricity generation in Brazil**. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 32, p. 532-547, 2014b.

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

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

SILVA, D. W. et al. Use of Castor Hull and Sugarcane Bagasse in Particulate Composites. **Key Engineering Materials**, v. 668, p. 381–389, 2015

SILVA, M. R. et al. Hybrid Sandwich Particleboard Made with Sugarcane, Pínus Taeda Thermally Treated and Malva Fibre from Amazon. **Materials Research**, v. 21, n. 1, p. 7, 2018.

SILVA, M. R. et al. Hybrid Sandwich Particleboard Made with Sugarcane, Pínus Taeda Thermally Treated and Malva Fibre from Amazon. **Materials Research**, v. 21, n. 1, 18 dez. 2017.

- SILVA, R. V. **Compósito de resina poliuretano derivada de óleo de mamona e fibras vegetais**. 154 p. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2003.
- SILVA, V. L. M. M.; GOMES, W. C.; ALSINA, O. L. S. Utilização do bagaço de cana de açúcar como biomassa adsorvente na adsorção de poluentes orgânicos. **Revista eletrônica de Materiais e processos**, v. 22, n. 1, p. 27–32, 2007.
- SILVEIRA, L. C. I. **Melhoramento genético da cana-de-açúcar para obtenção de cana energia**. 2014. 84f. Tese (doutorado). Universidade Federal do Paraná, UFPR, Curitiba, 2014.
- SOUZA, A. M. et al. Wood-based composite made of wood waste and epoxy based ink-waste as adhesive: A cleaner production alternative. **Journal of Cleaner Production**, v. 193, p. 549-562, 2018.
- TODD, J. A.; CURAN, M. A. **Streamline life-cycle assessment**: a final report from the SETAC north America streamline LCA workgroup. Environmental Toxicology. Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC) and SETAC Foundation for Environmental Education, 1999.
- UNICA. União da Indústria de Cana-de-Açúcar. UNICADATA. Acompanhamento de safra, **Relatório Safras Anteriores**. 2017/2018. 2018.
- WANG, J., HU, Y. Novel Particleboard Composites Made from Coir Fiber and Waste Banana Stem Fiber. **Waste and Biomass Valorization**, v. 7, n. 6, p. 1447-1458, 2016.
- WRAP, 2016. **WRAP and the circular economy**. <http://www.wrap.org.uk/about-us/about/wrap-and-circular-economy>. Acesso em: 17 out. 2018.
- YUBA, A. N. **Análise da pluridimensionalidade da sustentabilidade da cadeia produtiva de componentes construtivos de madeira de plantios florestais**. 2005. Tese (doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

APÊNDICE A – VALORES DAS ANÁLISES DE CONTRIBUIÇÃO DE IMPACTO REFERENTE ÀS CATEGORIA DE IMPACTO *MIDPOINT* DA METODOLOGIA ReCiPe

Tabela 12 - Valores de contribuição de impacto referentes à categoria Mudanças Climáticas (MC)

Processos	Unidade	Painel 1	Painel 2	Painel 3	Painel 4	Painel 5
Mix energético	kg CO2-Equiv.	43,40	92,23	43,16	90,67	47,72
Produção BCA		6,52	6,33	3,19	3,09	0
Transporte		7,24	9,33	13,34	9,52	7,65
Produção resina UF		157,25	0,00	154,21	0	209,73
Produção MDP		34,64	32,52	34,60	32,52	34,25
Produção resina PU mamona		0	13,42	0	13,08	0
Eucalipto		0	0	13,59	13,10	15,40
Total		249,04	153,83	262,08	161,97	314,74

Fonte: Própria autoria.

Tabela 13 - Valores de contribuição de impacto referentes à categoria Esgotamento de Recursos Fósseis (ERF)

Processos	Unidade	Painel 1	Painel 2	Painel 3	Painel 4	Painel 5
Mix energético	kg petróleo eq.	9,19	19,54	9,14	19,20	10,11
Produção BCA		1,50	1,46	0,74	0,71	0
Transporte		2,81	3,59	5,11	3,63	2,90
Produção resina UF		86,42	0	84,74	0	115,25
Produção MDP		25,10	17,27	24,95	17,27	23,64
Produção resina PU mamona		0	0	0	0	0
Eucalipto		0	0	0	0	0
Total		125,01	41,85	124,68	40,82	151,90

Fonte: Própria autoria.

Tabela 14 - Valores de contribuição de impacto referentes à categoria Toxicidade Humana (TH)

Processos	Unidade	Painel 1	Painel 2	Painel 3	Painel 4	Painel 5
Mix energético	kg 1,4-DB eq	0,399	0,848	0,397	0,834	0,439
Produção BCA		2,092	2,031	1,025	0,991	0
Transporte		0,134	0,174	0,244	0,177	0,141
Produção resina UF		8,593	0	8,427	0	11,461
Produção MDP		17,453	17,453	17,453	17,453	17,108
Produção resina PU mamona		0	2,048	0	1,995	0
Eucalipto		0	0	0	0	0
Total		28,67	22,55	27,55	21,45	29,15

Fonte: Própria autoria.

Tabela 15 - Valores de contribuição de impacto referentes à categoria Radiação Ionizante (RI)

Processos	Unidade	Painel 1	Painel 2	Painel 3	Painel 4	Painel 5
Mix energético	kg U235 eq.	2,464	5,237	2,451	5,148	2,710
Produção BCA		0,226	0,219	0,111	0,107	0
Transporte		0,231	0,304	0,417	0,310	0,247
Produção resina UF		5,677	0	5,568	0	7,572
Produção MDP		0,285	0,285	0,285	0,285	0,285
Produção resina PU mamona		0	12,646	0	12,323	0
Eucalipto		0	0	0	0	0
Total		8,883	18,692	8,831	18,174	10,814

Fonte: Própria autoria.

Tabela 16 - Valores de contribuição de impacto referentes à categoria Depleção de Metais (DM)

Processos	Unidade	Painel 1	Painel 2	Painel 3	Painel 4	Painel 5
Mix energético	kg Fe eq.	0,632	1,343	0,628	1,320	0,695
Produção BCA		0,480	0,466	0,235	0,227	0
Transporte		0,391	0,475	0,667	0,461	0,355
Produção resina UF		15,856	0	15,549	0	21,147
Produção MDP		0,141	0,141	0,141	0,141	0,141
Produção resina PU mamona		0	7,142	0	6,960	0
Eucalipto		0	0	0	0	0
Total		17,50	9,57	17,22	9,11	22,34

Fonte: Própria autoria.

Tabela 17 - Valores de contribuição de impacto referentes à categoria Depleção de Ozônio (DO)

Processos	Unidade	Painel 1	Painel 2	Painel 3	Painel 4	Painel 5
Mix energético	kg CFC-11 eq.	2,4E-06	5,16E-06	2,42E-06	5,07E-06	2,67E-06
Produção BCA		5,2E-07	5,03E-07	2,54E-07	2,45E-07	0
Transporte		1,2E-06	1,52E-06	2,17E-06	1,54E-06	1,23E-06
Produção resina UF		2,3E-05	0	2,25E-05	0	3,06E-05
Produção MDP		1E-05	9,99E-06	9,99E-06	9,99E-06	9,99E-06
Produção resina PU mamona		0	4,01E-08	0	3,91E-08	0
Eucalipto		0	0	0	0	0
Total		3,7E-05	1,72E-05	3,73E-05	1,69E-05	4,45E-05

Fonte: Própria autoria.

Tabela 18 - Valores de contribuição de impacto referentes à categoria Formação de Partículas (FP)

Processos	Unidade	Painel 1	Painel 2	Painel 3	Painel 4	Painel 5
Mix energético	kg PM10 eq.	0,037	0,078	0,036	0,076	0,040
Produção BCA		0,039	0,038	0,019	0,019	0
Transporte		0,018	0,024	0,034	0,025	0,020
Produção resina UF		0,224	0	0,220	0	0,299
Produção MDP		0,322	0,316	0,322	0,316	0,321
Produção resina PU mamona		0	0,150	0	0,146	0
Eucalipto		0	0	0,024	0,024	0,028
Total		0,640	0,606	0,656	0,606	0,708

Fonte: Própria autoria.

Tabela 19 - Valores de contribuição de impacto referentes à categoria Formação de Oxidantes Químicos (FOQ)

Processos	Unidade	Painel 1	Painel 2	Painel 3	Painel 4	Painel 5
Mix energético	kg NMVOC	0,081	0,173	0,081	0,170	0,089
Produção BCA		0,418	0,406	0,205	0,198	0
Transporte		0,072	0,094	0,135	0,097	0,079
Produção resina UF		0,371	0	0,364	0	0,495
Produção MDP		0,888	0,870	0,888	0,870	0,885
Produção resina PU mamona		0	0,406	0	0,395	0
Eucalipto		0	0	0,177	0,171	0,201
Total		1,831	1,948	1,850	1,901	1,749

Fonte: Própria autoria.

Tabela 20 - Valores de contribuição de impacto referentes à categoria Ocupação de Solo Agrícola (OSA)

Processos	Unidade	Painel 1	Painel 2	Painel 3	Painel 4	Painel 5
Mix energético	m2a	3,007	6,392	2,991	6,283	3,307
Produção BCA		35,798	34,751	17,539	16,947	0
Transporte		0,028	0,036	0,049	0,035	0,027
Produção resina UF		2,642	0	2,590	0	3,523
Produção MDP		0,018	0,018	0,018	0,018	0,018
Produção resina PU mamona		0	0	0	0	0
Eucalipto		0	0	175,500	169,147	198,840
Total		41,494	41,197	198,687	192,431	205,715

Fonte: Própria autoria.

Tabela 21 - Valores de contribuição de impacto referentes à categoria Transformação de Solo Natural (TSN)

Processos	Unidade	Painel 1	Painel 2	Painel 3	Painel 4	Painel 5
Mix energético	m2	0,036	0,077	0,036	0,075	0,040
Produção BCA		0,001	0,001	0,001	0,001	0
Transporte		0,004	0,005	0,007	0,005	0,004
Produção resina UF		0,054	0	0,053	0	0,072
Produção MDP		0,014	0,014	0,014	0,014	0,014
Produção resina PU mamona		0	-7,8E-12	0	-7,6E-12	0
Eucalipto		0	0	27,0	26,0	30,6
Total		0,109	0,096	27,1	26,1	30,7

Fonte: Própria autoria.

Tabela 22 - Valores de contribuição de impacto referentes à categoria Ocupação de Solo Urbano (OSU)

Processos	Unidade	Painel 1	Painel 2	Painel 3	Painel 4	Painel 5
Mix energético	m2a	0,109	0,232	0,108	0,228	0,120
Produção BCA		0,088	0,085	0,043	0,042	0
Transporte		0,081	0,111	0,150	0,115	0,093
Produção resina UF		0,850	0	0,834	0	1,134
Produção MDP		0,895	0,895	0,895	0,895	0,895
Produção resina PU mamona		0	0,075	0	0,073	0
Eucalipto		0	0	0	0	0
Total		2,023	1,397	2,030	1,352	2,241

Fonte: Própria autoria.

Tabela 23 - Valores de contribuição de impacto referentes à categoria Acidificação Terrestre (AT)

Processos	Unidade	Painel 1	Painel 2	Painel 3	Painel 4	Painel 5
Mix energético	kg SO2 eq.	0,127	0,270	0,126	0,266	0,140
Produção BCA		0,102	0,099	0,050	0,048	0
Transporte		0,041	0,054	0,077	0,055	0,045
Produção resina UF		0,632	0	0,620	0	0,843
Produção MDP		1,475	1,456	1,474	1,456	1,471
Produção resina PU mamona		0	0,600	0	0,585	0
Eucalipto		0	0	0,066	0,063	0,074
Total		2,377	2,479	2,414	2,474	2,574

Fonte: Própria autoria.

Tabela 24 - Valores de contribuição de impacto referentes à categoria Ecotoxicidade Terrestre (ET)

Processos	Unidade	Painel 1	Painel 2	Painel 3	Painel 4	Painel 5
Mix energético	kg 1,4-DB eq	5,60E-03	1,19E-02	5,57E-03	1,17E-02	6,16E-03
Produção BCA		6,20E-02	6,02E-02	3,04E-02	2,94E-02	0
Transporte		4,02E-04	5,19E-04	7,39E-04	5,30E-04	4,25E-04
Produção resina UF		1,01E-02	0	9,94E-03	0	1,35E-02
Produção MDP		8,97E-03	8,97E-03	8,97E-03	8,97E-03	8,97E-03
Produção resina PU mamona		0	1,22E-03	0	1,19E-03	0
Eucalipto		0	0	3,37E-09	3,25E-09	3,82E-09
Total		8,71E-02	8,28E-02	5,56E-02	5,18E-02	2,91E-02

Fonte: Própria autoria.

Tabela 25 - Valores de contribuição de impacto referentes à categoria Ecotoxicidade em Água Doce (ECAD)

Processos	Unidade	Painel 1	Painel 2	Painel 3	Painel 4	Painel 5
Mix energético	kg 1,4-DB eq	0,018	0,039	0,018	0,038	0,020
Produção BCA		0,129	0,125	0,063	0,061	0
Transporte		0,009	0,011	0,015	0,011	0,008
Produção resina UF		0,243	0	0,238	0	0,324
Produção MDP		0,022	0,022	0,022	0,022	0,022
Produção resina PU mamona		0	0,012	0	0,012	0
Eucalipto		0	0	1,26E-09	1,22E-09	1,43E-09
Total		0,421	0,209	0,357	0,144	0,374

Fonte: Própria autoria.

Tabela 26 - Valores de contribuição de impacto referentes à categoria Eutrofização em Água Doce (EAD)

Processos	Unidade	Painel 1	Painel 2	Painel 3	Painel 4	Painel 5
Mix energético	kg P eq.	1,47E-04	3,12E-04	1,46E-04	3,06E-04	1,61E-04
Produção BCA		1,71E-03	1,66E-03	8,39E-04	8,11E-04	0
Transporte		5,05E-05	6,14E-05	8,59E-05	5,94E-05	4,57E-05
Produção resina UF		1,44E-03	0	1,41E-03	0	1,92E-03
Produção MDP		3,76E-05	3,40E-05	3,75E-05	3,40E-05	3,69E-05
Produção resina PU mamona		0	1,56E-02	0	1,52E-02	0
Eucalipto		0	0	0	0	0
Total		3,39E-03	1,77E-02	2,52E-03	1,64E-02	2,17E-03

Fonte: Própria autoria.

Tabela 27 - Valores de contribuição de impacto referentes à categoria Ecotoxicidade Marinha (ECM)

Processos	Unidade	Painel 1	Painel 2	Painel 3	Painel 4	Painel 5
Mix energético	kg 1,4-DB eq.	0,0163	0,0347	0,0162	0,0341	0,0179
Produção BCA		0,0236	0,0229	0,0116	0,0112	0
Transporte		0,0078	0,0097	0,0136	0,0095	0,0074
Produção resina UF		0,2357	0	0,2311	0	0,3143
Produção MDP		0,0075	0,0074	0,0075	0,0074	0,0075
Produção resina PU mamona		0	0,0090	0	0,0087	0
Eucalipto		0	0	3E-08	2,89E-08	3,4E-08
Total		0,2909	0,0836	0,2800	0,0709	0,3471

Fonte: Própria autoria.

Tabela 28 - Valores de contribuição de impacto referentes à categoria Eutrofização Marinha (EM)

Processos	Unidade	Painel 1	Painel 2	Painel 3	Painel 4	Painel 5
Mix energético	kg N-Equiv.	0,019	0,040	0,019	0,039	0,020
Produção BCA		0,024	0,023	0,012	0,011	0
Transporte		0,023	0,030	0,044	0,031	0,026
Produção resina UF		0,111	0	0,109	0	0,148
Produção MDP		0,091	0,082	0,091	0,082	0,090
Produção resina PU mamona		0	0,478	0	0,465	0
Eucalipto		0	0	0,041	0,039	0,046
Total		0,267	0,652	0,314	0,668	0,330

Fonte: Própria autoria.

Tabela 29 - Valores de contribuição de impacto referentes à categoria Esgotamento de Água (EA)

Processos	Unidade	Painel 1	Painel 2	Painel 3	Painel 4	Painel 5
Mix energético	m3	1090,11	2316,83	1084,08	2277,53	1198,67
Produção BCA		9,91	9,62	4,85	4,69	0
Transporte		8,87	11,58	15,84	11,69	9,25
Produção resina UF		212,22	0	208,12	0	283,04
Produção MDP		9,00	8,77	9,00	8,77	8,96
Produção resina PU mamona		0	-28,68	0	-27,94	0
Eucalipto		0	0	0,053	0,051	0,060
Total		1330,11	2318,12	1321,94	2274,78	1499,98

Fonte: Própria autoria.

ANEXO A – MIX ENERGÉTICO UTILIZADO

Entradas	Qtd	Unidade
BR: electricity, bagasse, sugarcane, at fermentation plant [cogeneration]	0,3	MJ
BR: electricity, hydropower, at reservoir power plant [power plants]	2,35	MJ
CH: electricity, nuclear, at power plant [power plants]	0,9	MJ
ES: electricity, production mix photovoltaic, at plant [power plants]	0,005	MJ
PT: electricity, oil, at power plant [power plants]	0,09	MJ
RER: electricity, at wind power plant [power plants]	0,24	MJ
UCTE: electricity, hard coal, at power plant [power plants]	0,15	MJ
UCTE: electricity, natural gas, at power plant [power plants]	0,38	MJ
Saídas	Qtd	Unidade
BR: electricity, production mix BR [production mix]	3,6	MJ