

**UNIVERSIDADE DO ESTADO DO AMAZONAS
ESCOLA SUPERIOR DE TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

RAQUEL MARTINS GOMES

**AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA: UM ESTUDO DE CASO SOBRE COMPÓSITO
À BASE DE PLÁSTICO RECICLÁVEL E ENDOCARPO DE TUCUMÃ**

MANAUS

2021

RAQUEL MARTINS GOMES

**AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA: UM ESTUDO DE CASO SOBRE MADEIRA
PLÁSTICA À BASE DE PLÁSTICO RECICLÁVEL E ENDOCARPO DE TUCUMÃ**

Trabalho de conclusão de curso requisitado como
requisito parcial à obtenção do título de Bacharel
em Engenharia Mecânica, da Universidade do
Estado do Amazonas (UEA),

Orientador: Prof. Dr. Antonio Claudio Kieling

MANAUS

2021

G633a

Gomes, Raquel Martins

Avaliação do Ciclo de Vida: Um estudo de caso sobre madeira plástica à base de plástico reciclável e endocarpo de Tucumã / Raquel Martins Gomes. Manaus: [s.n], 2021.

66 f.: color.; 30 cm.

TCC - Graduação em Engenharia Mecânica -
Universidade do Estado do Amazonas, Manaus, 2021.

Inclui bibliografia

Orientador: Antonio Claudio Kieling

1. Avaliação de Ciclo de Vida. 2. Sustentabilidade. 3. Gestão Ambiental. 4. Madeira Plástica. I. Antonio Claudio Kieling (Orient.). II. Universidade do Estado do Amazonas. III. Avaliação do Ciclo de Vida: Um estudo de caso sobre madeira plástica à base de plástico reciclável e endocarpo de Tucumã

RAQUEL MARTINS GOMES

**Avaliação do Ciclo de Vida: um estudo de caso sobre madeira plástica à base de plástico
reciclável e endocarpo de Tucumã**

Este Trabalho de Curso foi considerado adequado para obtenção do título de bacharel em Engenharia Mecânica da Universidade do Estado do Amazonas (UEA) e aprovado em sua forma final pela comissão examinadora.

Manaus, 13 de julho de 2021

Banca examinadora:



Orientador: Prof. Dr. Antonio Claudio Kieling



Prof. Dr. Gilberto García del Pino



Prof. Dr. Aristides Rivera Torres

Dedico este trabalho de curso a minha mãe pelo carinho, amor dedicado, e apoio incondicional em todos os momentos de minha jornada acadêmica. Sua grande força foi o maior incentivo que permitiu o meu avanço, mesmo durante os momentos mais difíceis. Gratidão eterna.

AGRADECIMENTOS

Não poderia deixar de reconhecer todas as pessoas que me apoiaram e me incentivaram nesta jornada acadêmica. Agradeço primeiramente a Deus por me permitir superar todos os obstáculos enfrentados ao longo da realização deste trabalho.

Agradeço principalmente à minha mãe por todo apoio, incentivo e por não medir esforços para proporcionar condições para que eu pudesse manter o foco não só neste trabalho, mas em toda minha vida acadêmica, meu irmão e minha prima por sua amizade e por me proporcionar momentos de leveza em meio aos momentos difíceis. A essas dedico minha alegria por chegar ao fim deste percurso.

Sou imensamente grata a todos os professores de Engenharia Mecânica que compartilharam seus conhecimentos para que eu tivesse condições para escrever este trabalho.

Um agradecimento especial também aos meus amigos de graduação que foram essenciais para compartilhar dos inúmeros desafios que enfrentamos, sempre com o espírito de cooperação e apoio.

Agradeço ao meu orientador pelo incentivo, pela confiança depositada na minha proposta de projeto de pesquisa e por sempre estar presente para indicar a direção correta que o trabalho deveria tomar. As suas valiosas indicações fizeram toda a diferença.

A todos que participaram, direta ou indiretamente do desenvolvimento deste trabalho de pesquisa, enriquecendo o meu processo de aprendizado meus sinceros agradecimentos.

“A menos que modifiquemos a nossa maneira de pensar, não seremos capazes de resolver os problemas causados pela forma como nos acostumamos a ver o mundo”.

(Albert Einstein)

RESUMO

Existe atualmente uma certa urgência relacionada a assuntos de gestão ambiental, uma vez que diversos estudos científicos apontam para uma iminência de escassez de recursos naturais não renováveis por conta da exploração intensa e irresponsável com o metabolismo ambiental de se regenerar, além da crescente geração de resíduos sólidos que não são retornáveis para os ecossistemas. Por isso, é necessário repensar a forma como a humanidade consome, fabrica e descarta seus produtos, estes processos devem se dar de forma sustentável, uma vez que cada produto gera um impacto ao meio ambiente. Isto se dá através de adoção de ferramentas eficazes que se atenham ao ciclo de vida do produto como um processo cíclico, assim é possível fazer alterações para que este impacto ao meio ambiente seja reduzido. Por isto, este trabalho visa apresentar a Avaliação de Ciclo de Vida como um instrumento dessa mudança através de sua aplicação conforme as normas ISO 14040 e 14044. Além disto, apresentar uma metodologia para aplicação desta análise na produção de madeira plástica à base de plástico reciclável e endocarpo de Tucumã (*Astrocaryum sp.*) apresentando suas etapas, como se dá a metodologia para sua aplicação e como é possível atingir melhorias em processos e produtos através de sua utilização a partir da abordagem *cradle-to-gate* que se inicia com a extração dos recursos naturais até a produção do compósito.

Palavras-chave: Avaliação de Ciclo de Vida. Sustentabilidade. Gestão Ambiental. Madeira Plástica.

ABSTRACT

Currently, there is a certain urgency related to environmental management issues, since several scientific studies point to an imminent shortage of non-renewable natural resources due to the intense and irresponsible exploitation for the environmental metabolism to regenerate, in addition to the rising generation of solid waste that are not returnable to ecosystems. Therefore, it is necessary to reconsider the way humanity consumes, manufactures and disposes its products, these processes must take place in a sustainable way, since each product generates an impact on the environment. This is done through the adoption of effective tools that adhere to the product's life cycle as a cyclical process, so it is possible to make changes so that this impact on the environment is reduced. For this reason, this work aims to present the Life Cycle Assessment as an instrument of this change through its application according to ISO 14040 and 14044 standards. In addition, to present a methodology for applying this analysis in the production of plastic wood based on recyclable plastic and Tucumã endocarp (*Astrocaryum sp.*) presenting its stages, how the methodology for its application is given and how it is possible to achieve improvements in processes and products through its use, looking through cradle-to-gate approach that begins with natural resources extraction until the composite production.

Keywords: Life Cycle Assessment. Sustainability. Environmental Management. Wood Plastic.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1 - Relação entre os principais elementos da crie ambiental.....	16
Figura 2.1 - Estágios do ciclo de vida do produto.....	25
Figura 2.2 - Interrelação entre as etapas da ACV.....	27
Figura 2.3 - Exemplo de um sistema de produto.....	28
Figura 2.4 - Relação dos elementos da fase de interpretação com as outras fases da ACV..	32
Figura 2.5 - Aplicação de madeira plástica em produtos de construção.....	35
Figura 2.6 - Partes interiores de automóveis fabricadas com madeira plástica.....	36
Figura 2.7 - Simbologia dos tipos de plástico.....	41
Figura 4.1 – Ciclo de vida de um CMP a partir de endocarpo de Tucumã e PP.....	49
Figura 4.2 - Inventário do ciclo de vida da Madeira Plástica.....	52
Figura 4.3 - Diferença entre abordagens <i>midpoint</i> e <i>endpoint</i>	53
Figura 4.4 - Contribuição relativa das etapas do ciclo de vida do CMP.....	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Composição de CMPs.....	38
Tabela 2.2 - Propriedades físicas de CMPs.....	39
Tabela 2.3 - Propriedades físicas de CMPs.....	40
Tabela 4.1 - Impactos gerados por cada etapa do ciclo de vida.....	54

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
ISO	Organização Internacional de Padronização
ACV	Análise de Ciclo de Vida
ONU	Organização das Nações Unidas
MIT	Instituto de Tecnologia de Massachusetts
REPA	Análise de Perfil de Recurso e Meio Ambiente
LCA	Life Cycle Assessment
UNEP	Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente
SETAC	Sociedade de Química e Toxicologia Ambiental
DS	Desenvolvimento Sustentável
USEPA	United States Environmental Protection Agency
OCDE	Organization for Economic Cooperation and Development
CEI	Core Environmental Indicators
CMP	Compósito de Madeira Plástica
PP	Polipropileno
pET	Pó de Endocarpo de Tucumã
PEBD	Polietileno de Baixa Densidade
PEAD	Polietileno de Alta Densidade
PET	Politereftalato de etileno
ICV	Inventário de Ciclo de Vida
AICV	Avaliação de Impacto de Ciclo de Vida
GEE	Gases de Efeito Estufa
UVB	Ultravioleta B

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	15
1.1 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA.....	17
1.2 DELIMITAÇÃO DO ESTUDO.....	17
1.3 OBJETIVOS.....	18
1.3.1 Objetivo geral.....	18
1.3.2 Objetivos específicos.....	18
1.4 JUSTIFICATIVA.....	18
2. REFERENCIAL TEÓRICO.....	21
2.1 RELAÇÃO ENTRE MEIO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO.....	21
2.1.1 Evolução Histórica do Desenvolvimento Sustentável.....	21
2.1.2 Pilares do Desenvolvimento Sustentável.....	23
2.2 PRINCÍPIOS E ESTRUTURA DA ACV.....	24
2.2.1 Definição de Escopo e Objetivo.....	27
2.2.2 Análise de Inventário.....	28
2.2.3 Avaliação de Impacto.....	30
2.3.4 Interpretação.....	32
2.3.5 Evolução Histórica.....	33
2.3 COMPÓSITO DE MADEIRA PLÁSTICA (CMP).....	34
2.3.1 Evolução Histórica.....	36
2.3.2 Componentes.....	37
2.3.3 Produção.....	40
3. METODOLOGIA.....	44
3.1 MÉTODO.....	43
3.2 TÉCNICAS.....	45
3.3 PROCEDIMENTO.....	45
4. APRESENTAÇÃO DE DADOS E ANÁLISE DE RESULTADOS.....	47
4.1 ÍNDICES DE SUSTENTABILIDADE EM ORGANIZAÇÕES.....	47
4.2 ESTUDO DE CASO.....	49

4.2.1 Definição de objetivo e escopo.....	49
4.2.2 Análise de Inventário de ciclo de vida.....	52
4.2.3 Avaliação de impacto.....	54
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	57
5.1 CONCLUSÃO.....	57
5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	59
REFERÊNCIAS.....	60
ANEXO A.....	64
ANEXO B.....	64
ANEXO C.....	64
ANEXO D.....	65
ANEXO E.....	65
ANEXO F.....	65
ANEXO G.....	66

1. INTRODUÇÃO

Uma das principais bases da sociedade atual é o capitalismo. Este sistema rege a forma como o ser humano se relaciona com a natureza e o modo de produção ao redor do mundo. Essa relação tem se dado de forma degradante desde seu início marcado pela colonização e exploração do chamado “novo mundo” (continente africano, asiático e americano) por parte de países europeus em busca de bens e recursos naturais.

Através das Revoluções Industriais e com a evolução das tecnologias foram sendo aprimoradas as formas como os recursos naturais eram utilizados em benefício do ser humano, porém o distanciamento ser humano *versus* natureza foi ficando cada vez maior, uma vez que esta passou a ser vista, majoritariamente como fonte de recursos a serem explorados infinitamente e, ao mesmo tempo, com uma capacidade de absorção de dejetos infinita e cujo impacto era irrelevante, o que pode ser provado através da proporção tomada pelo aquecimento global, redução da camada de ozônio e mudanças climáticas nas últimas décadas.

Portanto, a economia e a produção não podem ser vistas como um sistema à parte do meio ambiente, tendo em vista que não existe atividade humana sem água, fotossíntese ou ação microbiana no solo. Um modelo sustentável deve se basear em fluxos que se ajustem aos ciclos naturais (Cavalcanti, 1995).

Além disto, o ritmo de consumo tem crescido e a tendência aponta para uma degradação ainda maior da natureza, seja em busca de matérias primas ou de expansão de território para industrialização, agronegócio e geração de energia para atender à crescente demanda. Gerando, assim um ciclo contínuo de degradação ambiental, conforme mostra a Figura 1.1.

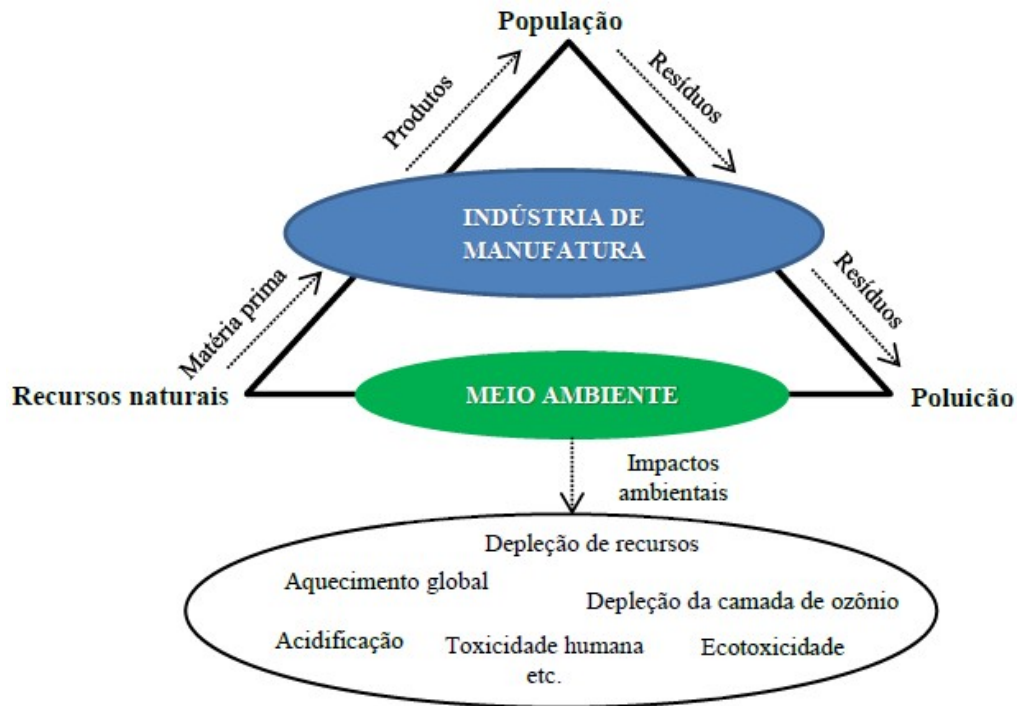


Figura 1.1 - Relação entre os principais elementos da crise ambiental (Fonte: SILVA, 2016)

Tendo em vista a urgência deste tema, é necessário propor alternativas para que haja uma maior harmonia entre humano x natureza. Isto pode se dar, principalmente, através da tomada de consciência dos impactos que a produção de bens tem na natureza e a mudança no modo de produção. Por isto, este trabalho tem como objetivo apresentar a ACV (Análise de Ciclo de Vida) como ferramenta para mensurar estes impactos ambientais e, assim, adequar a produção para uma melhor relação com o meio ambiente de forma que as futuras gerações também tenham acesso a estes recursos.

Entendendo que a ACV se trata de uma ferramenta mais completa de análise de como o produto interfere na natureza, uma vez que foca em cada estágio da vida de um bem desde a extração de suas matérias primas, processo de fabricação, uso e descarte, sua utilização é extremamente necessária em estudos de gestão ambiental de qualquer organização.

Aliado a isto, a atenção destinada a novos materiais compósitos à base de polímeros reforçados com fibras naturais tem crescido nas últimas décadas, isto se dá por conta de suas vantagens econômicas e relacionadas às suas propriedades mecânicas, além de sua vasta gama de aplicações na indústria automobilística e de construção civil.

Pelo fato de ser um dos materiais mais usados no cotidiano em embalagens e produtos em geral e possuir um tempo de degradação muito alto, já que possui alta resistência a

bactérias e fungos, o plástico em si se tornou um “passivo ambiental de ordem mundial”, como destaca Kieling et al. (2019).

Portanto é necessário buscar soluções que reduzam o uso e alternativas para reciclagem de termoplásticos. Desta necessidade surge a madeira plástica, um material compósito à base de plástico e madeira, que é vista como uma das pedras angulares do desenvolvimento sustentável.

1.1 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

Conforme visto anteriormente, a comunidade científica tem alertado a humanidade sobre a iminente escassez de recursos naturais que vai de encontro às necessidades de produção e consumo da presente e das próximas gerações. Considerando estudos prévios, a ACV pode ser usada como uma ferramenta para pautar novas metodologias de desenvolvimento de produto e apresentar o “pensar sustentável” de forma mais concreta e mensurável. Sendo assim, é possível fazer uma aplicação da ACV para o desenvolvimento de uma metodologia para avaliar o ciclo de vida de um compósito de madeira plástica à base de polipropileno e endocarpo de tucumã (*Astrocaryum aculeatum*)?

1.2 DELIMITAÇÃO DO ESTUDO

Os conceitos de sustentabilidade são muito amplos e permitem diversas linhas de pesquisa e abordagens conforme a área de conhecimento a ser explorada, contudo nesta monografia o foco será na aplicação a análise do ciclo de vida como forma de assegurar uma estratégia de sustentabilidade para empresas que apresente seus resultados de forma mensurável e como foco de intervenção estratégica com o objetivo de tornar a indústria de fabricação de produtos mais sustentável.

O trabalho apresentará os procedimentos para aplicação da Avaliação de Ciclo de Vida através de estudo teórico e, posteriormente, demonstrará como pode ser feita a aplicação da ACV no processo produtivo da madeira plástica à base de polipropileno e endocarpo de tucumã. A pesquisa decorrerá também através de exemplos a fim de demonstrar e ilustrar as aplicações da ferramenta, relacionando conceito teórico e prática. Cada etapa da ACV será abordada através de uma descrição dos estágios de cada uma individualmente e demonstrando como se relacionam com as fases do ciclo de vida de um produto utilizando a abordagem

cradle-to-gate que se restringe às etapas de extração dos recursos naturais, beneficiamento do material e produção industrial do compósito.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo geral

A presente pesquisa terá como meta principal identificar, através de estudo bibliográfico, como a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) pode ser usada como uma ferramenta durante o desenvolvimento de um produto desde sua concepção ao descarte de forma a reduzir os impactos ambientais ao longo da cadeia produtiva.

Além disto, a pesquisa também visa apresentar uma metodologia para aplicação da Avaliação do Ciclo de Vida na produção de compósito à base de polipropileno e endocarpo de tucumã na cidade de Manaus, através da qual é possível mensurar os impactos ambientais causados pela mesma.

Da mesma forma, a pesquisa se propõe a apresentar suas aplicações e limitações, bem como os elementos desta análise de ciclo de vida e como se dão seus resultados de modo a representarem dados de estratégia ambiental de gestão de produtos apresentando alternativas mais sustentáveis para o planeta.

1.3.2 Objetivos específicos

- Revisar bibliografia sobre sustentabilidade em empresas;
- Revisar bibliografia sobre a avaliação do ciclo de vida e suas normas;
- Identificar como se dá a categorização de indicadores de manufatura sustentável;
- Analisar como é possível aplicar a ACV à produção da madeira plástica à base de polipropileno e endocarpo de tucumã na cidade de Manaus;
- Utilizar metodologia científica para estudo da bibliografia e análise dos dados.

1.4 JUSTIFICATIVA

Durante o desenvolvimento de um novo produto, ou até mesmo de um novo processo é necessário atentar para os impactos que aquela mudança acarretará para o meio ambiente. Não só pelo zelo com a imagem da empresa e cumprimento de legislações ambientais, mas por ter consciência da situação atual de aquecimento global, desmatamento e iminência de escassez de recursos naturais para as próximas gerações.

Portanto, a atuação da Engenharia Mecânica no processo de desenvolvimento de novas tecnologias deve sempre levar em consideração o impacto daquela inovação no ambiente, uma vez que o (a) engenheiro (a) tem a função, principalmente, de propor ideias de inovação que irão beneficiar a sociedade como um todo, nisto inclui-se o ambiente em que vive e os recursos naturais que são utilizados.

Cada vez mais a Engenharia Mecânica tem caminhado rumo à sustentabilidade contribuindo com soluções voltadas para o meio ambiente. A criação de iniciativas mais conscientes ambientalmente que pensam em todo o ciclo do produto desde a extração dos recursos naturais até descarte e vida útil tem tomado o lugar da preocupação simplista apenas com o produto final.

Neste contexto, propõe-se o uso da ACV como uma ferramenta para sustentabilidade. Devido ao potencial da ACV em contribuir para melhoria dos aspectos ambientais esta alternativa pode ter importante participação no desenvolvimento desta área.

Levando isto em consideração, a depender dos resultados desta análise, é possível propor uma reorganização de estratégias durante a fase de desenvolvimento do produto visando prolongar sua vida útil, tornar sua desmontagem mais simples através do uso de PPD (*design for disassembly*), o que possibilita a reutilização de partes do componente em outros produtos, assim, não é necessário fabricar novamente estas peças, logo reduz-se a geração de resíduos e utilização de matéria prima e, desta forma, facilitar sua reciclagem.

Além disto, com o aumento da demanda por produtos manufaturados que minimizem os impactos ambientais, mantendo os benefícios sociais e econômicos exige das empresas a implementação de técnicas e ferramentas de manufatura sustentáveis, no entanto ainda existe um desafio sobre como implementar métodos de medida eficiente destes parâmetros.

Portanto, existe uma necessidade em utilizar indicadores para medir a sustentabilidade de produtos e a análise de ciclo de vida se apresenta como uma destas alternativas.

Trazendo esta análise para a realidade atual, com a proposta de novos materiais surgindo como alternativa para reduzir o consumo de materiais nocivos ao meio ambiente, é preciso observar e analisar como estes novos produtos impactam a natureza. Sendo assim, nasce a necessidade de utilizar a Avaliação de Ciclo de Vida para determinar de forma clara como se dá a relação entre a produção da madeira plástica à base de endocarpo de Tucumã e os impactos ambientais advindos da mesma.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 RELAÇÃO ENTRE MEIO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO

Antes de ser associada à palavra “desenvolvimento” a sustentabilidade era um termo que pertencia à biologia, por meio da ecologia, usado para designar as condições em que recursos naturais renováveis são extraídos de forma harmoniosa com a capacidade da natureza de reproduzir estes ecossistemas (Veiga, 2005). Ou ainda, refere-se à capacidade dos ecossistemas recuperarem-se e reproduzirem-se após agressões causadas pelo homem (uso abusivo dos recursos naturais, desflorestamento, fogo etc.) ou naturais (terremoto, tsunami, fogo, etc.) (Nascimento, 2012).

Já o desenvolvimento é inerente à ação humana como forma de garantir a reprodução da espécie, que se torna modificadora de seu entorno. Assim, a história da presença do homem sobre a Terra, é também a história da ação humana sobre a natureza. Portanto, o desenvolvimento econômico é objetivo de grande parte das atividades humanas.

Porém, entende-se atingir tal desenvolvimento não deve ser desejado a qualquer custo. É necessário tomar consciência das consequências da exploração do ambiente para garantir isto. Portanto, um dos desafios deste século é que as sociedades se tornem cada vez mais sustentáveis econômica, social e ambientalmente. Assim, é possível satisfazer as necessidades da geração atual sem comprometer as chances de futuras gerações disfrutarem dos mesmos recursos, o que conceitua o desenvolvimento sustentável. Para que isto aconteça é necessário priorizar o “pensamento integrado que percebe as interdependências entre os fenômenos sociais, ambientais e econômicos” (LOUREIRO, 2016, p.307).

2.1.1 Evolução Histórica do Desenvolvimento Sustentável

A partir da Revolução Industrial a natureza passou a ser vista como um objeto de uso econômico. Sua função se restringiu à exploração dos recursos naturais e matérias primas usados em processos de transformação nas fábricas.

Até 1970 o conceito de desenvolvimento era puramente material e econômico, visando principalmente a satisfação material, aquisição de bens e acúmulo de riquezas. Com essa perspectiva, a natureza era vista como algo externo aos seres humanos.

Com a amplificação do uso de satélites para monitoramento integrado dos vários processos atmosféricos e climáticos da Terra na década de 60 surge uma nova perspectiva de se ver o planeta. Estudos surgiram alertando sobre o futuro das condições humanas no planeta. O principal relatório, baseado em modelos matemáticos desenvolvidos por pesquisadores do Massachusetts Institute of Technology (MIT), foi publicado pelo Clube de Roma chamado “Os limites do crescimento”, cuja conclusão era de que se a humanidade continuasse a consumir os recursos naturais como na época, por consequência da industrialização, eles se esgotariam em menos de 100 anos uma vez que o planeta não suportaria o crescimento econômico e populacional ilimitado com base em recursos naturais finitos. Com isso, os debates sobre os limites de desenvolvimento do planeta começam a ganhar espaço internacionalmente.

Esta crescente preocupação com a questão ambiental mobilizou iniciativas governamentais e não governamentais no intuito de se discutirem e se proporem soluções. Entre elas, em 1972, a Organização das Nações Unidas realizou a Primeira Conferência Mundial sobre o Homem e o Meio Ambiente, responsável por reconhecer a necessidade de uma relação mais planejada entre conservação ambiental e desenvolvimento econômico industrial.

A partir dessa conferência, os questionamentos sobre como se daria o processo de desenvolvimento e quais as alternativas que poderiam ser pautadas se aprofundaram e, como resultado disso, a ONU criou a Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento para efetuar um estudo dos problemas globais de ambiente e desenvolvimento. Em 1987, esta comissão publicou o relatório “*Our Common Future*” (Nosso futuro comum), também conhecido como Relatório de Brundtland.

Foi no Relatório de Brundtland que o termo “desenvolvimento sustentável” foi apresentado pela primeira vez e definido como "o desenvolvimento que atende às necessidades presentes sem comprometer a habilidade das gerações futuras em atenderem às suas próprias necessidades".

Em 1989, a Assembleia das Nações Unidas aprovou a convocação da Conferência das Nações Unidas para o Meio Ambiente e o Desenvolvimento para 1992, conhecida como Rio-92, onde o conceito de desenvolvimento sustentável foi incorporado como um princípio orientador de ações. As principais ações tomadas durante esta conferência foram a criação da

Convenção da Biodiversidade e das Mudanças Climáticas – que resultou no Protocolo de Kyoto –, a Declaração do Rio e a Agenda 21.

2.1.2 Pilares do Desenvolvimento Sustentável

Para Sachs (2008), o desenvolvimento sustentável é caracterizado pela integração da relação integração das dimensões humana e ecológica, através da dignificação do indivíduo através da erradicação da pobreza e garantia de seus direitos básicos.

Partindo de uma análise sobre o desenvolvimento sustentável de perspectivas diferentes de níveis e significado, Sachs (2008) define cinco dimensões de sustentabilidade com o objetivo de definir ações e metas através de uma visão mais ampla. São estas: social, ambiental, territorial, econômico e política.

A sustentabilidade social está associada à reprodução de valores éticos e morais fundamentais como senso de solidariedade, liberdade e justiça. A sustentabilidade ambiental tem seus princípios baseados na eficiência de utilização de recursos naturais redução do uso de combustíveis fósseis e recursos não renováveis e controle na geração de resíduos através da reciclagem, reuso e remanufatura. Já a sustentabilidade territorial se relaciona com o conceito de distribuição espacial de recursos, atividades, populações e centralização de poder. Na sustentabilidade econômica é referenciado o conceito de preservação do patrimônio e lucro a longo prazo. A sustentabilidade política se associa à governança democrática como um valor necessário para que haja progresso segundo Sena (2014 *apud* Sachs 2008).

A partir destas dimensões propostas por Sachs, destaca-se a teoria dos três pilares do desenvolvimento sustentável tratada por Elkington (1998) com a publicação do artigo *The Triple Bottom Line: What is It and How Does It Work?*.

Econômico: De acordo com a visão de senso comum, o principal elemento do pilar econômico seria o lucro, porém esta abordagem propõe uma visão de busca por sustentabilidade econômica a longo prazo. Ao usar a perspectiva de desenvolvimento econômico, é necessário considerar o capital humano e intelectual associados ao capital econômico.

Pela definição clássica de DS, o desenvolvimento econômico pode ser repensado levando em conta a igualdade entre as gerações. Até este momento, o desenvolvimento

econômico era mais restrito aos determinantes fundamentais sem levar em consideração o meio ambiente.

Pondo em prática estes fundamentos, tem sido agregado recentemente ao desenvolvimento sustentável o conceito de economia verde, que se pretende a contribuir com a melhoria do bem-estar humano, equidade social e se preocupa com a redução de riscos ambientais e escassez ecológica.

Social: O pilar social está relacionado com o combate à desigualdade social resultante do descaso de autoridades acumulada ao longo dos anos, equalizando riquezas e, assim, evitando um tipo de crescimento econômico que concentra a maior parte do capital. Esta relação de transparência proposta pela sustentabilidade possibilita uma integração entre sociedade e corporações, conduzindo-as a uma maior necessidade por participação em ações sociais visando a dissipação da desigualdade social.

Ambiental: Desde os primórdios da humanidade era necessário transformar a natureza de alguma forma para garantir a sobrevivência da espécie em meio ao ambiente hostil que o homem habitava e todas as estratégias causavam alguma alteração no meio ambiente.

Após a Revolução Industrial e as transformações no modo de produção que esta trouxe consigo, passando de artesanal para manufaturado, as alterações causadas pelo ser humano no meio ambiente cresceram exponencialmente, uma vez que agora eram necessárias grandes quantidades de energia e recursos naturais, além da urbanização acelerada e não planejada, contaminação do ar, água e solo, desmatamento, consumo excessivo de recursos naturais não renováveis, alta concentração populacional, dentre outros.

Dessa forma, o desenvolvimento sustentável surge como uma proposta de preservação dos recursos naturais de forma a adequar o crescimento e a produção à continuidade dos ecossistemas. Para que tal aconteça é necessário que os padrões de consumo tenham a conservação do meio ambiente como uma prioridade e imprescindível não só para melhora na qualidade de vida, mas também para a continuidade da vida humana no planeta.

2.2 PRINCÍPIOS E ESTRUTURA DA ACV

Desde a década de 60, onde as discussões sobre os problemas ambientais tomaram maiores proporções no cenário global, as organizações têm buscado a implementação de

medidas para melhoria de desempenho ambiental de seus processos e produtos, que se manifestam através da redução da degradação do planeta. Muitas destas medidas detêm seu foco de atenção e atuação apenas sobre setores individuais e não sobre o processo de produção como um todo.

No entanto, para atender às necessidades da sociedade com relação ao desenvolvimento sustentável é preciso utilizar uma abordagem mais ampla que não se restrinja aos limites de cada unidade de uma organização, mas sim que se inicie do momento em que os recursos são extraídos do ambiente para fabricar o produto até o ponto em que os materiais retornam à natureza através do descarte e é a isto que a ACV se propõe (CURRAN, 2006).

A análise de ciclo de vida avalia cada um dos estágios da vida útil de um produto considerando que eles são interdependentes, ou seja, uma leva a outra. ACV permite a estimativa do impacto cumulativo de todos os estágios do ciclo de vida do produto no ambiente, o que geralmente inclui aspectos não contemplados em análises convencionais, como extração de matérias primas, transporte de material e descarte do produto.

O termo “ciclo de vida” se refere às atividades principais no curso da vida útil do produto desde sua fabricação, uso e manutenção até seu descarte final, incluindo a aquisição da matéria-prima necessária para sua fabricação. A Figura 2.1 ilustra os possíveis estágios do ciclo de vida de um produto que podem ser considerados em uma ACV e as entradas e saídas mais comuns.

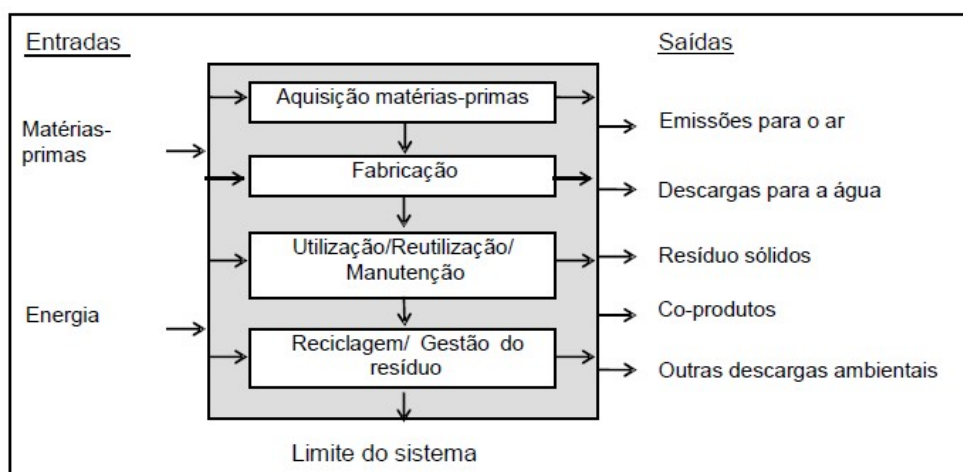


Figura 2.1 - Estágios do ciclo de vida do produto (Fonte: USEPA, 2001)

Em particular, ACV se caracteriza como uma técnica para avaliar os aspectos ambientais e potenciais impactos associados a um produto, processo ou serviço através de tais ações:

- Compilação de um inventário de insumos de energia e materiais relevantes e liberações ambientais;
- Avaliação dos impactos ambientais potenciais associados às entradas e liberações identificadas;
- Interpretação dos resultados para ajudar na definição de estratégias.

No que se refere às aplicações da ACV, pode-se dizer que isto depende do objetivo e escopo do estudo, mas de modo geral, suas principais aplicações de acordo com a ISO 14040 são:

- Identificar oportunidades de melhoria no desempenho ambiental de produtos;
- Reduzir custos pela substituição ou otimização no uso de materiais;
- Fornecer detalhado nível de informações aos tomadores de decisão na indústria e variadas organizações visando o planejamento estratégico, definição de prioridades e adequação a legislação ambiental;
- Implementação de esquema de rotulagem ambiental;
- Selecionar indicadores relevantes de desempenho ambiental.

Como metodologia de análise, o processo para realização de ACV possui princípios e uma estrutura bastante definida marcada por alguns estágios que ocorrem de acordo com os procedimentos demarcados pela ISO 14040. Para que haja maior transparência na execução e divulgação e por se tratar de uma análise bastante complexa do ciclo de vida de um produto com muitas variáveis esta análise deve ser desenvolvida através de algumas etapas essenciais.

A ACV dispõe de componentes que estão interrelacionados: definição de objetivo e escopo, análise de inventário, avaliação de impacto, e interpretação. É possível observar uma correlação das etapas entre si, admitindo uma retroatividade, conforme se observa na Figura 2.2.

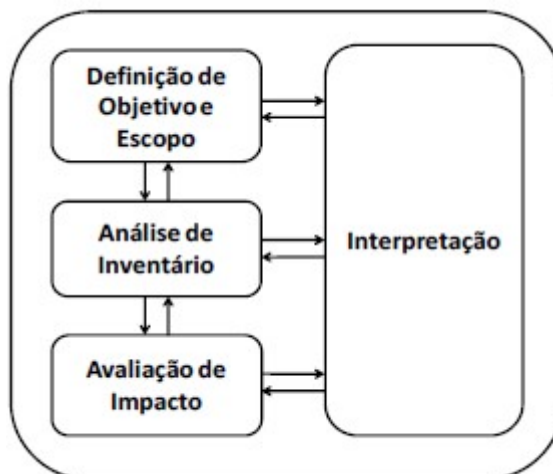


Figura 2.2 - Interrelação entre as etapas da ACV (Fonte: ISO 14040)

2.2.1 Definição de Escopo e Objetivo

O primeiro passo para se desenvolver uma ACV é a definição do objetivo da análise, o que é definido pela aplicação pretendida, razões para execução e público-alvo, a quem se pretende comunicar os resultados do estudo, em outras palavras. Após isso, é necessário definir o escopo do estudo, composto por alguns fatores, segundo a ISO 14040:

- O sistema de produto a ser estudado;
- As funções do sistema de produto ou, no caso de estudos comparativos, dos sistemas;
- A unidade funcional, que representa a quantidade das funções identificadas do produto com o objetivo de definir uma referência à qual as entradas e saídas estão relacionadas e garantir a comparabilidade de resultados.
- A fronteira do sistema, que define os processos elementares a serem incluídos no sistema, conforme mostra a Figura 2.3. A escolha da fronteira depende do escopo e objetivo do estudo e das restrições de dados. Deve-se descrever os critérios usados para definir a fronteira do sistema para assegurar confiabilidade ao estudo;

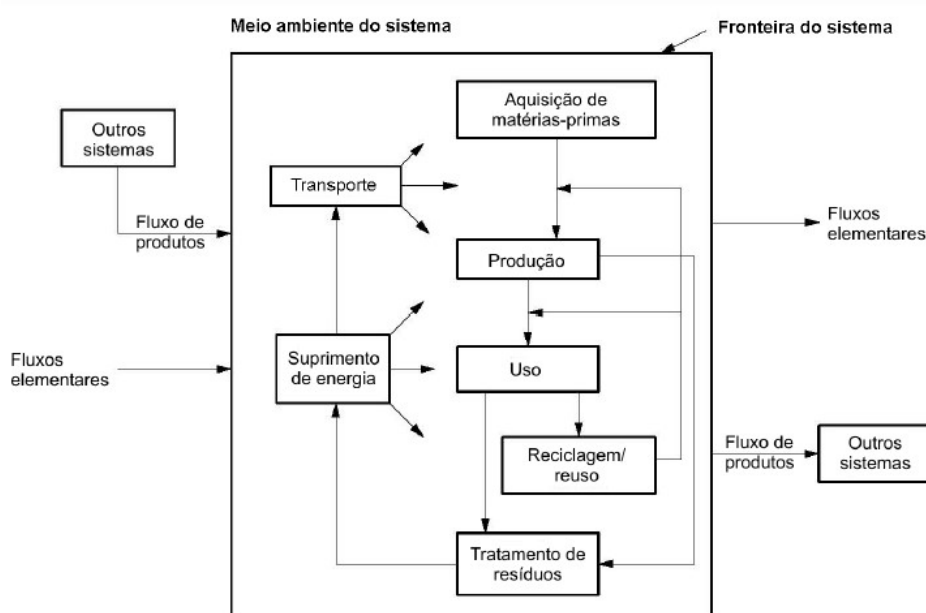


Figura 2.3 - Exemplo de um sistema de produto (Fonte: ISO 14040)

- Procedimentos de alocação;
- Categorias de impacto selecionadas e metodologia para avaliação de impactos bem como a interpretação subsequente a ser utilizada;
- Requisitos de dados;
- Pressupostos;
- Limitações;
- Requisitos iniciais quanto à qualidade dos dados;
- Tipo de análise crítica, se aplicável;
- Tipo e formato do relatório requerido para o estudo.

2.2.2. Análise de Inventário

Esta etapa tem por objetivo fazer a coleta de dados e procedimentos de cálculo para quantificar as entradas e saídas dos processos dentro das fronteiras do sistema. É um processo

iterativo, então seus resultados ou limitações podem resultar em uma mudança de escopo, objetivo, ou, até mesmo, na mudança das fronteiras do sistema.

De forma geral, deve abranger a coleta de dados nas áreas de:

- Entradas de energia, entradas de matéria-prima, entradas auxiliares, outras entradas físicas,
- Produtos, co-produtos e resíduos,
- Emissões atmosféricas, descargas para a água e solo, e
- Outros aspectos ambientais.

Segundo Curran (2006), alguns passos são essenciais para desenvolver um inventário de ciclo de vida satisfatório, são estes:

- Desenvolver um diagrama de fluxo para mapear as entradas e saídas dos processos dos processos que estão sendo avaliados. Para a coleta de dados é mais apropriado visualizar o sistema como uma série de subsistemas, definidos como um processo individual que faz parte do sistema completo. Cada subsistema requer entrada de materiais e energia e tem saída de produtos ou subprodutos.
- Desenvolver um plano de coleta de dados. Ao selecionar as fontes de dados deve ser levado em consideração a acuracidade e qualidade das fontes e os objetivos e escopo definidos previamente para o estudo. As fontes podem ser resultado de testes em laboratório, artigos e livros previamente publicados, especificações de processos e equipamentos, etc. O propósito e objetivo do estudo ajudam a definir o nível ou tipo de informação que será necessária.
- Coletar os dados, que envolve uma combinação de pesquisa, visita ao local onde ocorrem os processos e contato com profissionais experientes. Além disso, o uso de softwares disponíveis comercialmente para o desenvolvimento de ACV e base de dados de organizações especificamente para ACV são comumente usados.
- Avaliar e relatar resultados. Ao escrever um relatório para apresentar os resultados do inventário do ciclo de vida é importante descrever a metodologia utilizada, deixar explícito os sistemas analisados e as fronteiras que foram definidas.

As premissas utilizadas também devem ser explicadas. Geralmente, os resultados do inventário de ciclo de vida são dispostos em forma de tabela, o que facilita a compreensão dos resultados, além do uso de gráficos para ajudar na interpretação dos dados.

Esta etapa pode ter impasses e restrições devido à sua alta demanda por recursos, então estes fatores devem ser documentados no relatório de estudo.

2.2.3. Avaliação de Impacto

Nesta etapa, são avaliados os impactos no meio ambiente e saúde humana causados pelos fatores encontrados na fase anterior de ICV. Nesta etapa os dados de inventário são associados a categorias de impacto ambiental específicas e indicadores de categorias, portanto, deve conter os seguintes elementos:

- Seleção das categorias de impacto, indicadores de categoria e modelos de caracterização; Para uma AICV, os impactos são definidos como consequências causadas pelos fluxos de entrada e saída de um sistema na saúde humana, vegetação, animais, ou a futura disponibilidade de recursos. Geralmente, AICV é focada em três principais categorias: saúde humana, saúde ecológica e esgotamento de recursos. As categorias mais utilizadas são apresentadas no Quadro 2.1.
- Correlação dos resultados do ICV às categorias de impacto selecionadas (classificação), cujo objetivo é organizar e possivelmente combinar os resultados da AICV às categorias de impacto;
- Cálculo dos resultados dos indicadores de categoria (caracterização). A caracterização de impactos usa fatores de conversão para combinar resultados do ICV a indicadores representativos de impactos à saúde humana e ecológica. Fatores de caracterização traduzem diferentes entradas do inventário para indicadores de impacto diretamente comparáveis.

Quadro 2.1 - Categorias de Impacto de Vida mais usadas (Fonte: Adaptado de Curran, 2006)

Categoria de Impacto	Escala	Exemplo de dados de ICV	Possível Fator de Caracterização	Descrição do Fator de Caracterização
Aquecimento Global	Global	Dióxido de Carbono (CO ₂) Dióxido de Nitrogênio (NO ₂) metano (CH ₄) Clorofluorcarbonetos (CFCs) Hidroclorofluorcarbonetos (HCFCs) Brometo de Metila (CH ₃ Br)	Potencial de Aquecimento Global	Converte dados de ICV em equivalente de CO ₂ Nota: os potenciais de aquecimento global podem ser de 50, 100 ou 500 anos de potencial.
Esgotamento estratosférico do ozônio	Global	Clorofluorcarbonetos (CFCs) Hidroclorofluorcarbonetos (HCFCs) Halons Brometo de Metila (CH ₃ Br)	Potencial de esgotamento do ozônio	Converte dados de ICV em equivalentes de triclourofluormetano (CFC-11).
Acidificação	Regional Local	Óxidos Sulfúricos (SO _x) Óxidos de Nitrogênio (NO _x) Ácido Clorídrico (HCl) Ácido Fluorídrico (HF) Amoníaco (NH ₄) Fosfato (PO ₄)	Potencial de acidificação	Converte dados ICV em equivalentes de íons de hidrogênio (H ⁺).
Eutrofização	Local	Óxido de Nitrogênio (NO) Dióxido de Nitrogênio (NO ₂) Nitratos de Amônia (NH ₄)	Potencial de eutrofização	Converte dados ICV em equivalentes de fosfato (PO ₄).
Esgotamento estratosférico do ozônio	Global	Clorofluorcarbonetos (CFCs) Hidroclorofluorcarbonetos (HCFCs) Halons Brometo de Metila (CH ₃ Br)	Potencial de esgotamento do ozônio	Converte dados de ICV em equivalentes de triclourofluorometano (CFC-11).
Acidificação	Regional Local	Óxidos Sulfúricos (SO _x) Óxidos de Nitrogênio (NO _x) Ácido Clorídrico (HCl) Ácido Fluorídrico (HF) Amoníaco (NH ₄) Fosfato (PO ₄)	Potencial de acidificação	Converte dados ICV em equivalentes de íons de hidrogênio (H ⁺).
Eutrofização	Local	Óxido de Nitrogênio (NO) Dióxido de Nitrogênio (NO ₂) Nitratos de Amônia (NH ₄)	Potencial de eutrofização	Converte dados LCI em equivalentes de fosfato.
Poluição fotoquímica	Local	Hidrocarboneto não metano (NMHC)	Potencial de criação de óxidos fotoquímicos	Converte dados LCI em equivalentes de etano (C ₂ H ₆).
Toxicidade Terrestre	Local	Produtos químicos tóxicos com uma concentração letal relatada aos roedores	LC50	Converte dados da CV50 em equivalentes; usa modelagem multimídia, vias de exposição.
Toxicidade Aquática	Local	Produtos químicos tóxicos com uma concentração letal relatada aos peixes	LC50	Converte dados da CV50 em equivalentes; usa modelagem multimídia, vias de exposição.
Saúde Humana	Global Regional Local	Liberações totais para o ar, água e solo.	LC50	Converte dados da CV50 em equivalentes; usa modelagem multimídia, vias de exposição.
Esgotamento de recursos	Global Regional Local	Quantidade de minerais utilizados Quantidade de combustíveis fósseis usados	Potencial de esgotamento de recursos	Converte os dados LCI em uma razão da quantidade de recurso utilizado versus quantidade de recurso deixado na reserva.
Uso da Terra	Global Regional Local	Quantidade descartada em um aterro ou outras modificações de terra	Disponibilidade de terrenos	Converte massa de resíduos sólidos em volume usando uma densidade estimada.
Uso da água	Regional Local	Água usada ou consumida	Potencial de escassez de água	Converte dados LCI para uma razão da quantidade de água usada versus quantidade de recurso deixado na reserva.

2.3.4. Interpretação

Avaliar os resultados da análise de inventário e análise de impactos para definir o produto, processo ou serviço preferido a partir de um claro entendimento das incertezas e suposições usadas para gerar os resultados. É baseada nos seguintes elementos:

- Identificação das questões significativas com base nos resultados das fases de ICV e AICV da ACV;
- Uma avaliação do estudo, considerando verificações de completeza, sensibilidade e consistência;
- Conclusões, limitações e recomendações.

Segundo a ISO 14044, os resultados das fases de ICV ou AICV devem ser interpretados de acordo com o objetivo e escopo do estudo e a interpretação deve incluir uma avaliação e uma verificação de sensibilidade em relação às entradas, saídas e escolhas metodológicas significativas, visando ao entendimento da incerteza dos resultados. A forma como a fase de interpretação interage com as outras de uma ACV é mostrada na Figura 2.4.

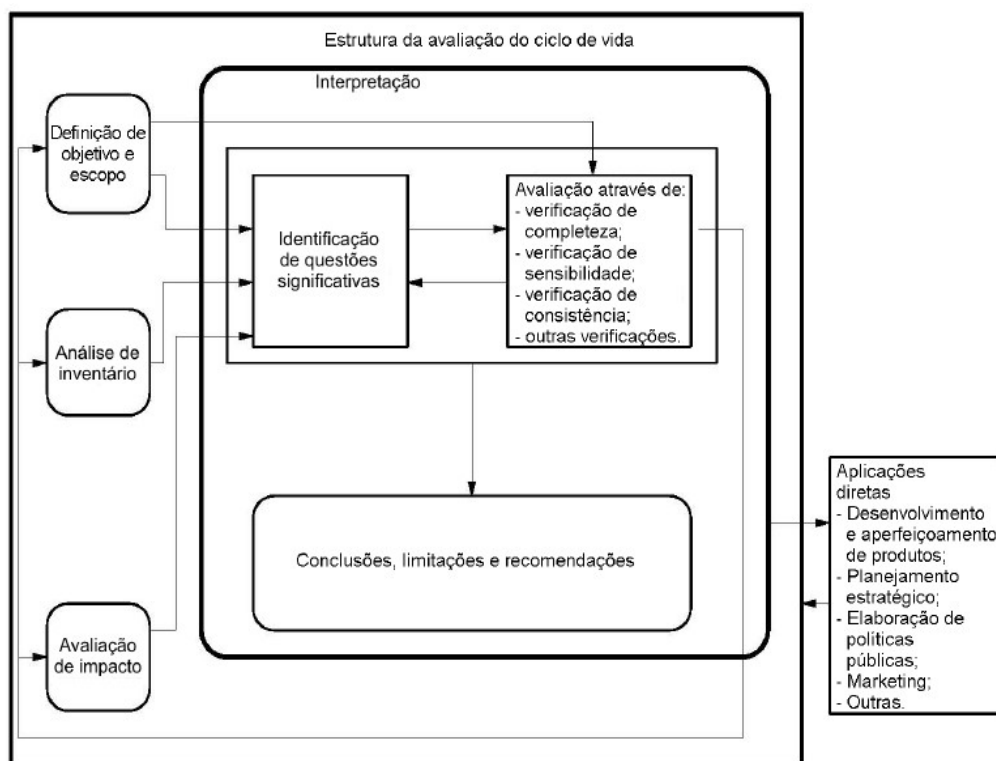


Figura 2.4 - Relação dos elementos da fase de interpretação com as outras fases da ACV (Fonte: ISO 14044)

2.3.5. Evolução Histórica

O termo ACV, ou em inglês, “*Life Cycle Assessment*” (LCA) foi utilizado de forma pioneira em 1993 em uma publicação chamada *The LCA Sourcebook* para apresentar estruturalmente a Análise de Ciclo de Vida como uma metodologia avançada para gestão ambiental. Apesar disto, em uma das primeiras publicações do tipo, Harold Smith relatou seus cálculos dos requerimentos de energia cumulativa para a fabricação de produtos químicos na Conferência Mundial de Energia em 1963.

Posteriormente, no fim da década de 60 os debates contemplando assuntos relacionados a problemas ambientais começaram a atingir proporções globais. A percepção sobre a interdependência entre o uso de recursos naturais e o desenvolvimento da economia industrial ficou mais explícita e urgente, isto motivou a formação do Clube de Roma em 1968 com objetivo de identificar os principais problemas que determinarão o futuro da humanidade.

Quatro anos depois, em 1972, o Clube de Roma publicou o relatório de seus estudos chamado *Limites do Crescimento*, que previu um cenário de colapso devido ao desequilíbrio entre o consumo e oferta finita de recursos naturais. As previsões de esgotamento iminente de combustíveis fósseis e mudanças climatológicas resultantes do excesso de resíduos estimulou cálculos mais detalhados de uso e produção de energia em processos industriais.

Neste contexto, em 1969, foi conduzido pelo “*Midwest Research Institute*” (MRI) primeiro estudo que viria a ser entendido como ACV promovido pela Coca Cola nos Estados Unidos com o objetivo de identificar qual embalagem para refrigerantes teria as menores emissões e utilizaria menos recursos em sua fabricação.

O processo de quantificar o uso de recursos ambientais de produtos se tornou conhecido como REPA (*Resource and Environmental Profile Analysis*), Análise de Perfil de Recursos e Ambiental. Com o crescente interesse público encorajando as indústrias a assegurar a acuracidade das informações de domínio público e com a escassez de petróleo nos anos 70 foi desenvolvida uma metodologia padrão de pesquisa para conduzir estes estudos.

Em 1988 ao se tratar do problema mundial dos resíduos sólidos, a ACV novamente veio à tona como uma ferramenta para analisar problemas ambientais. Por ser de interesse de várias áreas que afetam os recursos e crescimento ambiental, a metodologia de ACV estava sendo constantemente aprimorada e expandida.

Em 1991, alegações sobre o uso inapropriado de ACV por motivos de *marketing* feitas por indústrias resultaram em uma declaração emitida por onze procuradores-gerais nos EUA denunciando o uso de resultados de ACV para promover produtos. Essa ação, juntamente com a pressão de outras organizações ambientais para padronizar a metodologia ACV, levou ao desenvolvimento da norma ISO 14040 Gestão Ambiental – Avaliação do Ciclo de Vida – Princípios e Estrutura. Uma série de outras normas foi publicada até a última, ISO 14044:2006 com os requisitos e orientações para a execução de um estudo ACV.

Em 2002, o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (UNEP) se associou à Sociedade de Química e Toxicologia Ambiental (SETAC) para lançar a Iniciativa do Ciclo de Vida como uma parceria internacional que visa incentivar a prática da abordagem do ciclo de vida.

Apesar de não ser exigido para fabricação de produtos, há uma série de medidas que tornam o estudo de Ciclo de Vida indispensável. Na França, com a promulgação da lei Grenelle II, as empresas devem divulgar informações sobre o teor de carbono, o consumo de recursos naturais e os impactos ambientais nas embalagens de seus produtos. A rotulagem ambiental do tipo III, normatizada pela ISO 14025:2006, está sendo um critério marcante no comércio internacional e é integralmente baseada na ACV.

2.3 COMPÓSITO DE MADEIRA PLÁSTICA (CMP)

O compósito conhecido como madeira plástica consiste em um tipo de material composto que combina polímeros, geralmente termoplásticos, com elementos provenientes de madeira como fibras, partículas, lâmina ou floco com o objetivo de extrair. Tradicionalmente, se trata de uma matriz de um termoplástico reforçados com uma carga de madeira.

A partir desta combinação é possível produzir um material de melhor performance, uma vez que agrega os atributos positivos da madeira e do plástico, como a alta durabilidade, baixo custo de manutenção, além de ser menos nocivo ao meio ambiente, uma vez que pode ser fabricado através de plástico reciclável e, até mesmo, madeira caída, conforme estudo de Ayrilmis et al. (2015).

A madeira plástica se apresenta como uma solução viável economicamente, competitiva e com vantagens em relação à madeira convencional, além de se encaixar como uma

tecnologia ambientalmente saudável, segundo o conceito declarado no documento da Agenda 21 Global:

“as tecnologias ambientalmente saudáveis protegem o meio ambiente, são menos poluentes, usam todos os recursos de forma mais sustentável, reciclam mais seus resíduos e produtos e tratam os dejetos residuais de uma maneira mais aceitável que as tecnologias que vieram substituir” (ONU, 1992)

Em comparação com compósitos de termoplásticos reforçados com fibra sintética ou mineral, a madeira plástica, cuja fibra é de origem vegetal, possui um custo de produção inferior, além de gerar menos desgaste e danos aos equipamentos de processamento. A fibra também sofre menos danos quando a madeira é utilizada, assim é possível ainda reciclar rejeitos da produção sem comprometer a qualidade final do produto.

Em geral, existem algumas desvantagens quando se compara um compósito de termoplástico reforçado com fibra sintética e outro com fibra vegetal em relação à absorção de água e dilatação da espessura. Além disso, por conta da natureza polar da madeira e não polar do termoplástico, não existe uma adesão tão consistente, sendo necessário utilizar agentes de acoplamento para determinadas proporções de madeira e plástico (WOLCOTT; ENGLUND, 1999).

Por conta da versatilidade deste material, a madeira plástica pode ter diversas aplicações, onde se destaca a construção civil (Figura 2.5), agropecuária, indústria de móveis, transportes rodoviário e ferroviário e setores de: transmissão de energia, de embalagens para transporte e armazenamento de carga, de embalagens pesadas para transporte de máquinas e produtos diversos destinados à exportação e setor de automóveis (Figura 2.6).



Figura 2.5 - Aplicação de madeira plástica em produtos de construção (Fonte: [Ecopex](#))



Figura 2.6 - Partes interiores de automóveis fabricadas com madeira plástica (Fonte: FARSI, 2012)

2.3.1 Evolução Histórica

No início dos anos 1970, uma indústria italiana desenvolveu produtos destinados a painéis de portas automotivas, prateleiras e painéis de telhado, à base de misturas 50:50 de madeira e polipropileno.

Na década de 1990, produtos semelhantes estavam sendo feitos em uma escala substancial nos EUA. Empresas do setor de produtos florestais competiam com os principais fornecedores de cloreto de polivinila (PVC) usados em materiais de construção para ganhar mercado.

Empresas como Louisiana Pacific, American Woodstock, Mobil Oil e Strandex foram proativas no fornecimento de produtos como mesas de piquenique e pisos industriais. A fabricação de *decks* emergiu facilmente como a aplicação mais bem-sucedida, respondendo por mais de metade do CMP vendido na América do Norte, uma vez que este novo material não era mais suscetível à ação de cupins.

No Japão, a marca E-Wood, que é responsável pela produção de um material CMP com a composição básica de 55% de madeira e 45% de PP foi patenteada pela empresa Ein Co. Ltd. Já em 2003 uma empresa em Taiwan a produção de perfis, pisos e molduras a partir de compósitos plástico-madeira com nome Eubert.

Alguns anos depois, em 2008, no Brasil, a Universidade Positivo (Curitiba-PR) incubou uma empresa de produção de compósitos plástico-madeira chamada Madeplast, cuja ideia era lançar no mercado um produto inovador e sustentável chamado de madeira ecológica. Após dois anos de pesquisa, foi lançada a madeira ecológica Madeplast, que se propôs a substituir a

madeira convencional. Sua fabricação era resultado do aproveitamento de resíduos plásticos descartados pela indústria e restos de madeira e serragem provenientes de madeiras legalizadas.

2.3.2 Componentes

Outra vantagem da madeira plástico é a vasta gama de possibilidades de combinações entre termoplásticos e espécies das quais a madeira pode ser utilizada. Além disto é possível obter diversas proporções de madeira x polímero x aditivos que geram distintas propriedades físicas e mecânicas, além de usar variantes de moldagem no processo produtivo, conforme é possível observar no Quadro 2.2.

Quadro 2.2 - Dados sobre aplicações de madeira plástica e composições (Fonte: Adaptado de Kieling; Pereira; Dos Santos, 2019)

Material	Aplicação	Processo Produtivo	Fonte
PET - Serragem (<i>Anogeissus leiocarpus</i>)	Painéis de WPC	Extrusão 270°C, injeção 170-200°C	Oladejo et al. (2017)
PEAD - Serragem (<i>pinus pinaster</i>) - anidrido maleico/am	Painéis de WPC	Prensagem a quente (2,5 MPa) a 180°C por 8 min e prensagem a frio diminuindo a T até 25 °C (12 min)	Mbarek et al, (2010)
PP (virgem/v - reciclado/r) - Serragem (<i>pine flour</i>) 0.2 a 0.5 mm - anidrido maleico/am	Testes propriedades WPC	Extrusão 186-190°C	Bhaskar; Haq; Yadav (2011)
PP - Serragem (<i>pinheiro</i>) anidrido maleico/am - Nanopartículas de Argila	Testes propriedades WPC com argila	Injeção 170-220-200°C (início-bico-molde)	Yadav; Yusoh (2015)
PEAD - fibras (<i>Pinus taiwanensis</i> , <i>Trema orientalis</i> , <i>Phyllostachys makinoi</i> , <i>Cunninghamia lanceolata</i>)	Testes propriedades WPC com fibras asiáticas	Prensagem a quente (2,5 MPa) a 180°C por 8 min e prensagem a frio diminuindo a T até 25 °C (12 min)	Hung et al. (2017)
Lã mineral reciclada, Fibra de madeira, PP, Anidrido maleico, Agente lubrificante, agente silano	Testes propriedades WPC com lã mineral	Material homogeneizado previamente, resistência à flexão diminui com acréscimo de lã mineral, material extrudado	Väntsi (2015)
Serragem (<i>Pinus sylvestris</i>), zeolite, PP, anidrido maleico/am	Testes propriedades WPC com zeolite	Material extrudado (175-190°C) e injetado (180°C)	Kaymakci et al, (2017)
PP (virgem/v e reciclado/r), Casca arroz, Serragem, Corante (painéis externos prédio)	Blocos de WPC construção civil	Material extrudado (175-190°C), painéis expostos a radiação UV	Zaini et al (2016)

Material	Aplicação	Processo Produtivo	Fonte
PP (virgem/v - reciclado/r) - Serragem (<i>pine flour</i>) 0.2 a 0.5 mm - anidrido maleico/am	Testes propriedades WPC	Extrusão 186-190°C, MEV mostra boa adesão com uso de anidrido maleico	Bhaskar et al. (2012)
PEAD, Serragem (pinheiro), 0.25 a 0.43 mm, tratamento deslignificação	Testes propriedades WPC sem lignina	Material extrudado (180°C) e injetado (190°C), deslignificado/cloreto de sódio/ácido acético (AA)	Chen et al. (2014)
PP, Serragem (pinheiro), PRIEX agente acoplamento	Testes propriedades WPC com aglomerante	Material extrudado em tábuas, agente de acoplamento melhora propriedades	Byk (2018)
PEBD, PEAD, PET, Serragem (sumaúma)	Testes propriedades WPC perfil tábuas	Material de sachês/água, containeres, garrafas/água, separados e utilizados com serragem 0-0.5, 0.5-1.0, 1.0-2.0 mm	Oluyeye et al. (2017)
PEAD, Serragem (<i>Paraserianthes falcataria</i>)	Placas de WPC	Material extrudado em tábuas	Arandha et al. (2017)
PP, Serragem (<i>Pinus taeda e elliotti</i>)	Testes propriedades WPC sem aditivos	Material extrudado duas vezes e depois injetados corpos de prova	Battistelle et al. (2014)

No estudo conduzido por Martinez-Lopez et al. (2020) é feita uma comparação entre seis modelos de composição de madeira plástica, em que se varia a madeira entre as espécies de *Pinus caribaea*, *Pinus cubensis*, *Cedrela odorata*, *Talipariti elatum*, *Eucalyptus sp.* e a quantidade de cada termoplástico utilizado, variando entre PET, PEAD, PEBD e PP. Carbonato de cálcio, ácido esteárico, estereato de cálcio, estereato de zinco e silano (SiH4) foram utilizados como aditivos de acoplamento em proporções iguais até 10%. A Tabela 2.1 mostra quais as proporções utilizadas identificando a nomenclatura a ser utilizada para cada uma das composições.

Tabela 2.1 – Composição de CMPs (Fonte: Adaptado de Martinez-Lopez, 2020)

Composições	Tipo de Madeira	Termoplástico (%)				Aditivo (%)	Madeira (%)
		PET	PEAD	PEBD	PP		
C1	Serragem de <i>Pinus caribaea</i>	-	13,33	13,33	13,34	10	50
C2	Serragem de <i>Pinus cubensis</i>	13,33	-	13,34	13,33	10	50

Composições	Tipo de Madeira	Termoplástico (%)				Aditivo (%)	Madeira (%)
		PET	PEAD	PEBD	PP		
C3	Serragem de <i>Cedrela odorata</i>	13,33	13,34	-	13,33	10	50
C4	Serragem de <i>Talipariti elatum</i>	13,34	13,33	13,33	-	10	50
C5	Serragem de <i>Eucalyptus sp.</i>	10	10	10	10	10	50
C6	Serragem de <i>Pinus caribaea</i> , <i>Pinus cubensis</i> , <i>Cedrela odorata</i> , <i>Talipariti elatum</i> , <i>Eucalyptus sp.</i>	10	10	10	10	10	50

O encapsulamento das partículas de madeira por parte do termoplástico desempenha um importante papel nas propriedades físicas do CMP, uma vez que é um fator considerável para melhoria de propriedades físicas. Este efeito pode ser atingido através da matriz termoplástica dentro do composto e alguns aditivos como agentes de acoplamento que facilitam a ligação entre as partículas de madeira e a matriz termoplástica e proporcionam resistência ao impacto em painéis segundo Garay & Silva (2011 *apud* Martinez-Lopez et al., 2020).

Especificamente, foi notado que existe uma relação inversamente proporcional entre a densidade e as propriedades mecânicas e diretamente proporcional com as propriedades mecânicas. Como é possível ver na Tabela 2.2, o aumento da densidade resulta em uma menor absorção de água e dilatação, portanto um menor teor de umidade, causado pelo efeito da matriz termoplástica no painel. A absorção de água e dilatação do CMP é uma de suas vantagens, pois garante que possa ser usado em ambiente aberto.

Tabela 2.2 - Propriedades físicas de CMPs (Fonte: Adaptado de Martinez-Lopez, 2020)

Composições	Propriedades físicas dos CMPs			
	Teor de umidade (%)	Densidade aparente (kg/m ³)	Absorção de água em 72h	Dilatação (%)
C1	5.40 (0.84)	1,032 (2.08)	0.50 (0.96)	0.30 (0.71)
C2	5.42 (1.15)	1,035 (1.71)	0.50 (0.71)	0.30 (1.41)
C3	5.34 (0.71)	1,037 (1.58)	0.40 (0.58)	0.28 (0.96)
C4	5.34 (0.71)	1,031 (2.12)	0.44 (0.72)	0.25 (0.84)

Composições	Propriedades físicas dos CMPs			
	Teor de umidade (%)	Densidade aparente (kg/m ³)	Absorção de água em 72h	Dilatação (%)
C5	5.35 (0.58)	1,035 (1.41)	0.41 (0.76)	0.23 (1.15)
C6	5.23 (0.48)	1,060 (0.70)	0.32 (0.46)	0.18 (0.41)

A Tabela 2.3 mostra os resultados da resistência à tração em flexão estática variando de 15,20 a 18,53 MPa, de acordo com as concentrações de termoplásticos e densidades usadas. Existe um aumento na densidade para cada composição e, com isso, também aumenta a resistência a tração, também possibilitada através do uso do carbonato de cálcio como aditivo químico, provendo uma melhor estabilidade para o material.

Tabela 2.3 - Propriedades físicas de CMPs (Fonte: Adaptado de Martinez-Lopez, 2020)

Composições	Propriedades mecânicas dos CMPs		
	Flexão estática (MPa)	Compressão (MPa)	Tração (MPa)
C1	15.35 (0.96)	120.20 (0.98)	22.4 (0.98)
C2	15.38 (0.94)	124.26 (0.95)	22.7 (0.76)
C3	15.38 (0.71)	126.26 (0.97)	23.7 (0.74)
C4	16.34 (0.73)	128.24 (1.15)	24.4 (0.90)
C5	16.43 (0.82)	130.31 (0.89)	26.2 (0.72)
C6	18.53 (0.58)	138.10 (0.74)	29.4 (0.52)

Resultados similares foram encontrados por Moya (2001 *apud* Martinez-Lopez, 2020) usando proporções de 60-40% de serragem de espécie conífera e termoplástico sem aditivos químicos variando entre 13.20 e 18.56 MPa para painéis produzidos através de injeção plástica.

Os estudos de Wang et al. (2010 *apud* Martinez-Lopez, 2020) indicaram que quanto maior a proporção de madeira na composição dos painéis, menor a resistência à tração. Na pesquisa de Martinez-Lopez et al. (2020) foi estabelecida a proporção de 50% de madeira e as

propriedades mecânicas foram melhoradas através da mistura de todas as espécies estudadas e aditivos químicos que facilitaram a conexão entre as partículas e as propriedades do compósito.

2.3.3 Produção

Os principais processos de fabricação de compósitos de madeira plástica são: coleta e separação, moagem e segunda lavagem, extrusão, resfriamento e moldagem por injeção e moldagem por compressão ou termoformagem (prensagem).

O primeiro passo para a produção de madeira plástica é a coleta de resíduos plásticos descartados previamente. A princípio é possível utilizar qualquer tipo de termoplástico, contudo os mais utilizados são polietileno de baixa densidade (PEBD) e polietileno de alta densidade (PEAD).

A identificação das resinas termoplásticas é feita através de um código universal, que pode ser observado no rótulo do produto ou no próprio corpo da peça representado por um número que representa a qual polímero reciclável pertence o objeto. A Figura 2.7, ilustra as identificações de cada tipo de plástico.

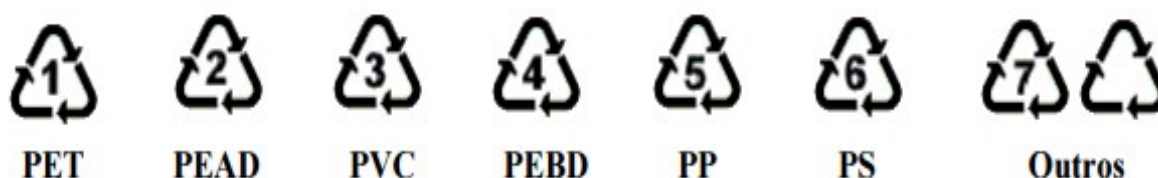


Figura 2.7 - Simbologia dos tipos de plástico (Fonte: NAZÁRIO, 2016)

Cada sigla representa um material polimérico: PET (Politereftalato de etileno), PEAD (Polietileno de Alta Densidade), PVC (Policloreto de Vinila), PEBD (Polietileno de Baixa Densidade), PP (Polipropileno), PS (Poliestireno) e outros plásticos diferentes dos anteriores.

Antes de prosseguir para a etapa de moagem é necessário fazer a separação dos materiais pois existem dois tipos de perfil de madeira plástica, os de cores claras, que utilizam apenas o plástico branco, e os perfis de cores escuras, que utilizam o plástico colorido. É imprescindível ter uma boa estrutura de coleta seletiva para garantir a separação dos plásticos e a eliminação de

possíveis itens contaminantes. Estes procedimentos, podem ser realizados tanto em usinas de triagem, pontos de geração ou até mesmo no próprio local da reciclagem. (NAZÁRIO, 2016).

Durante o processo de moagem, os plásticos são triturados e transformados em grânulos, facilitando a homogeneidade na fundição. Após isso seguem para a lavagem, que é necessária, se houver alguma impureza dentre os grãos, caso contrário, é dispensável.

A extrusora é o núcleo de um sistema de processamento de CMP, e o objetivo principal da extrusora é fundir o polímero e homogeneizar o polímero, madeira e aditivos em um processo referido como composição. Além disso, a extrusora transporta a mistura composta de madeira-polímero através do molde. Existem quatro tipos principais de sistemas de extrusão usado para processar perfis CMP. Estes são:

- Rosca simples

Uma extrusora de fibra compósita de rosca simples é o sistema menos complexo de extrusão para a produção de perfis CMP. Ela trabalha em dois estágios, fusão e medição, e possui uma seção de ventilação para remover os voláteis. O método de alimentação de material é geralmente através de funil gravimétrico. O mecanismo de fusão / mistura é o calor do barril e a rotação da rosca.

As vantagens da extrusora de rosca simples são que ela é uma tecnologia já estabelecida e este método tem o menor custo de aquisição. As desvantagens incluem alto custo de matéria-prima, menor taxas de produção, necessidade de sistema de secagem, polímero é fundido com a fibra, o que causa um maior risco de decomposição térmica da fibra, alta velocidade do parafuso (rpm) com maior risco de queima na ponta do parafuso, e incapacidade de manter a temperatura de derretimento baixa com pressões mais elevadas (GARDNER; HAN; WANG, 2015)

- Dupla rosca:

Extrusoras de rosca dupla, geralmente, são usadas quando as de rosca simples não são capazes de atingir a pressão e mistura desejadas. A rotação das roscas pode ser classificada em co-rotante e contra-rotante. Roscas co-rotantes estão orientadas na mesma direção, enquanto que as contra-rotantes rotacionam em direções opostas.

Extrusoras de rosca dupla contra-rotantes são capazes de gerar pressões mais elevadas necessárias para alguns perfis específicos de aplicação. Extrusoras co-rotantes não geram as mesmas pressões elevadas, porém um desenho de rosca apropriado pode proporcionar uma excelente mixagem e um curto intervalo de tempo de espera.

Apesar do custo de manufatura de extrusoras de rosca dupla ser mais alto devido à precisão no equipamento, é uma forma eficaz de fabricar compósitos para reação química e processos de modelagem a base de polímeros sensíveis a calor e cisalhamento, como PP com as menores temperaturas (WOLCOTT, ENGLUND, 1999).

Junto com a extrusora, a matriz é uma parte importante do sistema de extrusão de CMP. A matriz dita as dimensões e perfil (forma) da peça extrudada. A matriz é tipicamente aquecida usando elementos de aquecimento de cartucho e pode empregar resfriamento a ar para processar adequadamente o perfil oco das peças. As matrizes podem ser bastante simples ou complexas, dependendo do perfil desejado. Após a matriz, vem o tanque de resfriamento, que é usado para firmar o perfil extrudado em sua forma linear. O tanque de resfriamento consiste em um sistema de transporte de esteira com cabeças de spray de água acopladas que borrifam água fria no perfil extrudado. O tanque de resfriamento pode ter 6 a 12 m de comprimento, dependendo do material produzido na extrusora e a capacidade de resfriamento necessária. A água proveniente do spray normalmente é reutilizada e pode passar por um resfriador ou trocador de calor para manter a água de pulverização fria. Após o tanque de resfriamento, o perfil CMP passa por uma serra de corte que corta o material de acordo com os comprimentos desejados.

Após estas operações elementares, chega a fase de moldagem, que pode ser por injeção ou compressão. A moldagem por injeção é usada para produzir peças contendo geometrias complexas sem exigir uma etapa de acabamento adicional. Um exemplo típico de uma peça CMP moldada por injeção seria uma tampa de poste para estruturas de guarda-corpo. Moldagem por compressão ou termoformação de CMP tem sido pesquisado por muitos anos e tem sido amplamente utilizado na fabricação de peças compósitas para automóveis (GARDNER; HAN; WANG, 2015).

3. METODOLOGIA

3.1 MÉTODO

O presente trabalho utilizará as seguintes metodologias:

- a) **Prospecção tecnológica:** Método sistemático de mapear e analisar desenvolvimentos tecnológicos e científicos que podem influenciar de forma significativa uma indústria ou a sociedade como um todo e ajudar a gerar estratégias para a criação de um resultado desejável.
- b) **Pesquisa exploratória:** Constitui o estágio inicial de uma pesquisa científica. Consiste em caracterizar, classificar e definir inicialmente o problema a ser estudado. Seu principal objetivo é fazer um levantamento aprofundado da bibliografia para o pesquisador criar maior familiaridade com o tema. Também permite ao pesquisador escolher as técnicas de pesquisa que mais se adequem a seu projeto e alertar as potenciais dificuldades.
- c) **Pesquisa explicativa:** Consiste em registrar e analisar as informações obtidas durante a pesquisa exploratória, identificar as causas do problema em questão, através do método experimental ou através da interpretação por meio de métodos qualitativos.
- d) **Qualitativo:** Neste método de pesquisa os procedimentos de análise são, em sua maioria, de natureza qualitativa. Diferente das pesquisas experimentais, não existem roteiros e fórmulas predefinidas para orientar a pesquisa e análise dos resultados.
- e) **Quantitativo:** Consiste em usar a quantificação tanto na busca por dados quanto na análise dos mesmos. O principal benefício é a precisão dos dados diminuindo a margem à subjetividade e divergência.
- f) **Pesquisa bibliográfica:** O foco desta modalidade de pesquisa é em materiais de estudos elaborados previamente por terceiros principalmente em livros e artigos científicos.
- g) **Método dedutivo:** Parte de princípios gerais reconhecidos como verdadeiros e possibilita chegar a conclusões de maneira puramente formal para um caso particular.

3.2 TÉCNICAS

As técnicas usadas para o desenvolvimento do projeto serão as de busca em bibliografias sobre o tema. A busca bibliográfica, ou de fonte secundária, engloba toda bibliografia que já foi tornada pública em ligação ao tema de estudo, a começar de publicação avulsa, jornais, revistas, boletins, livros, pesquisas, monografias, teses, material cartográfico, meios de comunicação orais (LAKATOS E MARCONI, 2006).

3.3 PROCEDIMENTO

Conforme Lakatos e Marconi, (2007, p.223) “Procedimentos constituem etapas mais concretas da investigação, com finalidade mais restrita em termos de explicação geral dos fenômenos menos abstrato. Pressupõem uma atitude concreta em relação ao fenômeno e estão limitadas a um domínio particular. Nas ciências sociais os principais métodos de procedimentos são: históricos, comparativos, monográficos ou estudo de caso estatístico, tipológicos funcionalista, estruturalista.”.

A princípio foi feito um levantamento bibliográfico preliminar para definição do tema, conhecimento da problemática, contexto atual do assunto e de pesquisas existentes. Pode ser entendido como pesquisa exploratória para trazer à pesquisadora familiaridade com o tema e possibilitar a delimitação do assunto através da definição de subáreas para possibilitar a visualização mais clara do tema por ser mais restrito. Através desta pesquisa preliminar também foi possível definir os objetivos e propósitos iniciais.

Em seguida foi realizada a formulação do problema propriamente dita e a elaboração do pré-projeto a ser analisado pelo orientador explicitando a justificativa, objetivos gerais, específicos, bibliografia, definição do problema e hipóteses do projeto de pesquisa.

A partir das definições do pré-projeto foi iniciada uma busca mais aprofundada na bibliografia, leitura do material existente em periódicos científicos, teses, dissertações para gerar uma base sólida para a fundamentação teórica do trabalho.

A partir da fundamentação teórica será feita uma análise dos dados obtidos e organização lógica do assunto para iniciar a redação do texto da monografia contendo as conclusões obtidas do tema.

Em seguida será feito um estudo de como se dá a aplicação da análise de ciclo de vida em processo e na fabricação de produtos baseando-se nas normas ISO aplicáveis. Compreendendo a forma como estes processos se desenvolvem e as etapas de cada um, será estabelecida uma relação com a melhoria de sustentabilidade dos processos.

Após isso será feita uma proposta de aplicação da ACV na produção de madeira plástica à base de endocarpo de tucumã e polipropileno reciclável na cidade de Manaus, finalizada pela discussão de resultados apresentando as conclusões e considerações finais.

4. APRESENTAÇÃO DE DADOS E ANÁLISE DE RESULTADOS

4.1 ÍNDICES DE SUSTENTABILIDADE EM ORGANIZAÇÕES

Na última década, aconteceu um aumento na demanda sobre as indústrias para pensar além dos benefícios econômicos de seus processos e produtos e considerar os efeitos ambientais e sociais. Assim, tornou-se objetivo dos fabricantes promover processos de fabricação e produtos manufaturados que minimizem os impactos ambientais, mantendo os benefícios sociais e econômicos. Esta situação desafiou as empresas de manufatura em todo o mundo a se manterem competitivas no mercado, desenvolvendo e implementando técnicas e ferramentas de manufatura sustentáveis. Os fabricantes começaram a encontrar soluções de medição de sustentabilidade; porém, poucos métodos de medição eficazes estão disponíveis para avaliar os impactos da fabricação no meio ambiente e na sociedade.

De acordo com Joung (2013), pelo menos onze conjuntos de indicadores principais foram desenvolvidos para analisar e pontuar a sustentabilidade dos processos de manufatura. Como o campo de aplicação da avaliação da sustentabilidade é amplo e novo, uma série de medidas e métricas por meio de indicadores, índices e estruturas para a análise da manufatura sustentável também foram desenvolvidas. A existência de muitos conjuntos de indicadores gerou certa instabilidade entre os fabricante no momento de selecionar um conjunto operacional de indicadores para avaliar a sustentabilidade de seus processos e produtos.

Especificamente, as empresas de manufatura têm sido desafiadas a decidir quais indicadores escolher para avaliar seus processos e produtos, e como devem interpretar esses indicadores para tornar seus processos e produtos sustentáveis. Sikdar (Sikdar, 2003) afirma que não existe consenso sobre uma taxonomia razoável de métricas relacionadas à sustentabilidade. Por exemplo, a Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE) (OCDE CEI, 2003) Indicadores Ambientais Básicos (CEI) incluem 46 indicadores para medir o impacto das atividades industriais sobre o meio ambiente em países industrializados, enquanto a Comissão das Nações Unidas de Desenvolvimento Sustentável (UNCSD, 2007) identifica 96 indicadores para abordar a deterioração do meio ambiente devido às atividades humanas.

4.2 ESTUDO DE CASO

4.2.1 Definição de objetivo e escopo

Esta pesquisa tem por objetivo avaliar o ciclo de vida da produção do compósito de madeira plástica à base de polipropileno reciclável e madeira proveniente do endocarpo do tucumã, observando os aspectos ambientais de cada etapa e quantificando os impactos ambientais potenciais pelo método ReCiPe 2016 de AICV com a finalidade de propor oportunidades de melhorias no perfil ambiental do processo produtivo.

O público-alvo é a comunidade acadêmica, pesquisadores, praticantes de ACV, empresas, órgãos pesquisadores entre outros que apresentam interesse em elementos comuns ao ciclo de vida do sistema estudado.

Uma vez que o produto em questão é intermediário e a produção considerada é em escala de laboratório, será considerada a abordagem *cradle-to-gate*, ou seja, o foco será apenas na extração das matérias primas, beneficiamento, produção do painel, sem incluir as fases de uso do produto e descarte. Além disto, por não se tratar do produto final, não é possível definir o tipo de produto a ser produzido com o CMP e, por consequência a função específica.

Por se tratar de uma abrangência *cradle-to-gate*, a unidade funcional será igual ao fluxo de referência, 36 placas de CMP, de medidas 178 x 118 x 3 mm com densidade média de 0,873g/cm³ (2kg de mistura a 80% PP e 20% pET), devido a escala de produção ter sido laboratorial.

A Figura 4.1 representa o sistema do produto de forma esquemática, considerando os sistemas de produção florestal e industrial.

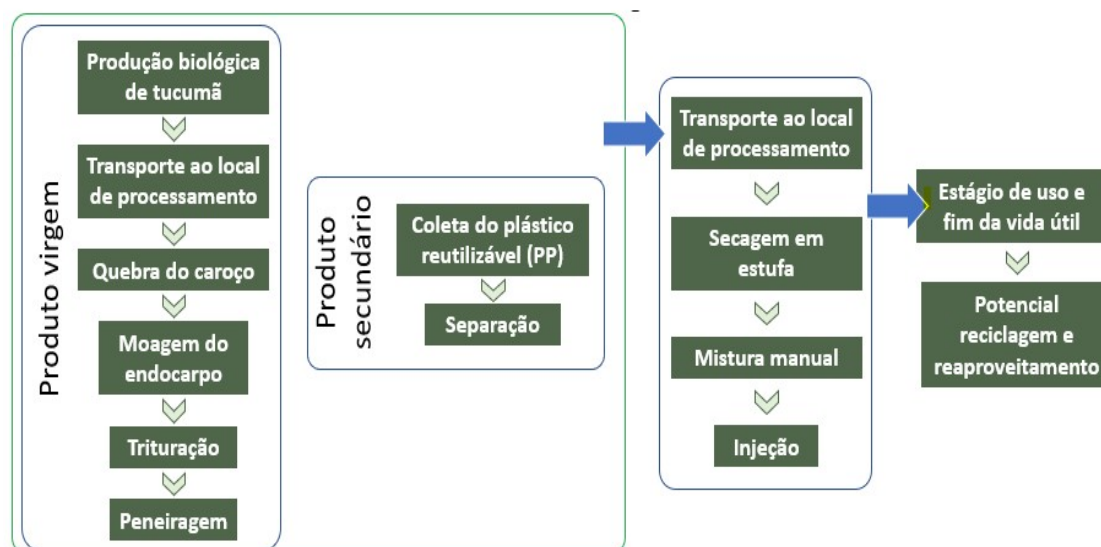


Figura 4.1 – Ciclo de vida de um CMP a partir de endocarpo de Tucumã e PP (Fonte: Autora, 2021)

A fronteira do sistema irá abranger os processos de trituração das partículas de tucumã, secagem em estufa e injeção do material, por serem os processos que requerem entrada de energia. O processo de transporte foi considerado como um elemento da análise inicialmente, porém não apresenta impacto significativo nos resultados, por se tratar de uma distância abaixo de 600km, conforme estudo de Stübs et al. (2012 *apud* Sommerhuber et al., 2016). Além disto, está sendo considerado para este sistema o Polipropileno reutilizável como forma de reciclagem.

O programa utilizado foi o *OpenLCA*, por ser um software gratuito que permite a modelagem profissional do ciclo de vida. A base de dados utilizada foi a *Agribalyse* para determinar os impactos associados a cada etapa do ciclo de vida. O método utilizado para a avaliação dos impactos foi ReCiPe 2016 midpoint.

No que se refere à coleta de dados, houve limitações pela parte da madeira de tucumã, por se tratar de um produto regional e suas características e perfil não estarem disponíveis nas bases de dados, além de limitações para informações específicas do Brasil.

Serão apresentadas neste trabalho as categorias de impacto ambiental que tiveram maior expressão no impacto total e que são mais utilizadas em outras Avaliações de Ciclo de Vida na bibliografia pesquisada. São estas:

- Acidificação: Está relacionada aos impactos da acidificação gerados pelo uso e emissão de produtos químicos transportados pelo ar. Define processos que aumentam a

acidez (pH) da água e do solo através da deposição de substâncias ácidas produzidas, em sua maioria, pelas emissões de dióxido de nitrogênio (NO_x), dióxido de enxofre (SO₂) e amônia (NH₃). A unidade de medida dessa categoria é comumente expressa em dióxido de enxofre equivalente (kg SO₂-eq) (FREIRE, 2015).

- **Aquecimento Global:** Refere-se às mudanças climáticas que possuem vários impactos diretos nos ecossistemas, dentre eles o efeito estufa. A unidade de medida dessa categoria é expressa em quilograma de CO₂ equivalente (kg CO₂-eq). Os Gases de Efeito Estufa são substâncias que absorvem a radiação infravermelha da Terra. Para determinar a mudança na concentração e forçamento radiativo de cada GEE, é necessário levar em conta o tempo de permanência da substância na atmosfera. O Painel Intergovernamental de Mudança Climática calculou o forçamento radiativo de todos os GEE e marca os seus potenciais de aquecimento global. Estes potenciais de aquecimento global são usados diretamente como fatores de caracterização (FREIRE, 2015).

- **Eutrofização:** Esta categoria aborda os impactos dos nutrientes fósforo e nitrogênio sobre os ecossistemas aquáticos e terrestres. A eutrofização terrestre é causada pela deposição de emissões atmosféricas de compostos nitrogenados, como óxidos de nitrogênio (NO e NO₂) dos processos de combustão e amônia (NH₃) provenientes, por exemplo, da agricultura (FREIRE, 2015).

- **Ecotoxicidade Terrestre:** A ecotoxicidade terrestre avalia o potencial toxicológico das substâncias químicas nos seres vivos. Este potencial é levantado em testes toxicológicos. Os modelos e fatores para efeito de toxicidade devem ser baseados no risco relativo e associado às consequências de produtos químicos que são liberados no ambiente. Devem representar o destino de um produto químico no ambiente, a exposição de espécies e as diferenças na resposta toxicológica (probabilidade de efeitos e gravidade). Comumente a substância de referência é 1,4-diclorobenzeno, um conhecido pesticida e é expressa em diclorobenzeno (DCB) equivalente (kg DCB-eq/kg de emissão) (FREIRE, 2015).

- **Escassez de recursos fósseis:** Esta categoria avalia a depleção de recursos e a redução da disponibilidade da reserva total de potenciais funções de recursos, devido ao uso além de sua taxa de substituição. Para a abordagem dessa categoria

recomenda-se que os impactos sejam concentrados na exploração direta dos recursos. A unidade desta categoria é expressa em petróleo equivalente kg oil-eq.

- **Depleção na camada de ozônio:** O ozônio estratosférico é essencial para a vida, pois ele impede que a radiação solar prejudicial UV-B penetre nos níveis mais baixos da atmosfera. Se essa radiação não é absorvida pela camada de ozônio, ela pode aumentar os riscos de câncer de pele humana e de catarata, além de causar envelhecimento precoce e inibição do sistema imunológico. No âmbito geral, pode trazer danos aos ecossistemas terrestres e aquáticos. A depleção da camada de ozônio refere-se a diminuição da camada de ozônio estratosférico, como resultado de várias substâncias cloradas e bromadas, tais como CFCs e halons. Estas substâncias têm tempo de vida longa na atmosfera, e podem chegar à estratosfera. O potencial de destruição do ozônio está relacionado à medida da potência para formar equivalentes de cloro estratosférico. O potencial de destruição de ozônio são fatores de equivalência que integram o tempo de residência na atmosfera de substâncias capazes de destruir o ozônio, a formação de equivalentes de cloro estratosférico e o resultado da destruição do ozônio estratosférico. A unidade dessa categoria é expressa em kg de clorofluorcarbonos (kg de CFC-eq.) (FREIRE, 2015).

- **Toxicidade Humana:** Esta categoria é provocada por substâncias tóxicas que afetam a saúde humana, ao serem ingeridas ou inaladas. Os efeitos considerados são toxicológicos crônicos, carcinogênicos e não carcinogênicos. Os modelos e fatores para efeitos toxicológicos devem basear-se no risco relativo e consequências relacionadas aos produtos químicos que são liberados no ambiente. Devem representar o destino de um produto químico no ambiente, a exposição humana e as diferenças na resposta toxicológica (probabilidade de efeitos e gravidade). A substância de referência é 1,4-diclorobenzeno, um conhecido pesticida e é comumente expressa em diclorobenzeno equivalente (kg de DCB-eq./kg de emissão)

4.2.2 Análise de Inventário de ciclo de vida

Os inventários de ciclo de vida foram ordenados seguindo o padrão comumente adotado em estudos de ciclo de vida nas bibliografias utilizadas e nas recomendações das ISO 14040 e ISO 14044 estabelecendo balanços de massa e energia. Cada inventário é apresentado de

acordo com os dados coletados e convertido para a unidade funcional definida, conforme mostrado na Figura 4.2.



Figura 4.2 - Inventário do ciclo de vida da Madeira Plástica (Fonte: Autora)

Para obter-se a madeira, os caroços de tucumã foram quebrados com auxílio de um cilindro metálico, sendo separados o endocarpo lenhoso da amêndoa. O endocarpo foi quebrado novamente com o auxílio de um cilindro metálico e separados em pequenos pedaços manualmente, para posteriormente serem triturados em um moinho e posteriormente peneirados, sendo obtido um pó de madeira de tucumã com granulometria $577 \pm 134 \mu\text{m}$. Já o propileno reciclável é proveniente de resíduos sólidos urbanos (KIELING, 2018).

As matérias primas (pó de endocarpo de tucumã - pET e PP) foram usadas in natura, ocorreu apenas uma trituração conforme descrito anteriormente. Para preparar a mistura da madeira plástica, o PP e pET foram, anteriormente, submetidos a um processo de secagem em estufa de 1500W por seis horas. O ecocompósito foi obtido na proporção em massa de 80% de PP de 20% de PET (KIELING, 2018).

Após a preparação das matérias primas, o processo de injeção foi iniciado para a confecção das placas. O equipamento utilizado para a injeção foi uma injetora de com capacidade de fechamento das placas de 90 toneladas com tempo de ciclo total de 44,3 segundos com resfriamento de 25 segundos (KIELING, 2018).

4.2.3 Avaliação de impacto

Foram incluídos os fluxos elementares de produção do polipropileno, trituração da madeira no moinho, secagem do material na estufa e moldagem por injeção no software *OpenLCA* usando a base de dados *Agribalyse*, que contém estes processos e todos os fluxos elementares associados a eles com seus devidos produtos, subprodutos e emissões.

Na seção de *input* foram adicionadas as massas de PP e de madeira para resultar em um *output* de 2kg de madeira plástica respeitando a proporção de 80% de massa para o termoplástico e 20% para a madeira, o que resultou em 1,6kg de plástico e 0,4kg de madeira. Em seguida, foi adicionado o processo de secagem do material usando os dados de potência e tempo fornecidos no trabalho que deu origem ao CMP em questão publicado por Kieling et al. (2018), que resultou em um consumo de energia de 32MJ e após isso um processo de moldagem por injeção que gera 2kg de CMP.

A partir disto, foi selecionado o método de análise de ciclo de vida ReCiPe 2016, pois utiliza as abordagens de *midpoint*, em que todas as substâncias referentes ao ICV são adequadamente agregadas em categorias de impacto de acordo com uma característica comum na cadeia de causa efeito do mecanismo ambiental. Estas características não representam as consequências finais sobre o percurso ambiental das emissões listadas no inventário do ciclo de vida (ICV), conforme demonstra a Figura 4.3 evidenciando as diferenças entre as abordagens *midpoint* e *endpoint*, mas são indicadores de impacto em potencial e é menos aberto a subjetividade.

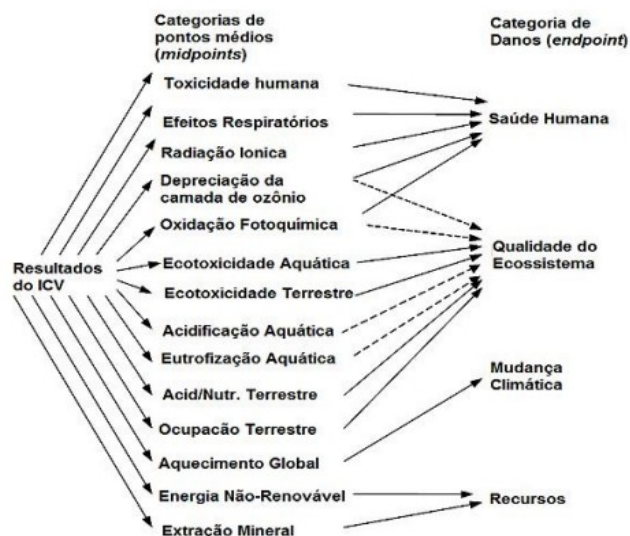


Figura 4.3 - Diferença entre abordagens *midpoint* e *endpoint* (Fonte: PIEKARSKI, 2012)

Após isso o programa usa o método e a abordagem selecionados para chegar aos valores de impacto ambiental referente a cada uma das categorias de impacto e o valor de contribuição de cada etapa do ciclo de vida naquela categoria. Os dados gerados são apresentados da Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Impactos gerados por cada etapa do ciclo de vida (Fonte: Autora)

	Aquecimento Global [kg CO2 eq]	Acidificação [kg SO2 eq]	Eutrofização [kg P eq]	Escassez de recursos fósseis [kg petróleo eq]	Depleção da camada de ozônio [kg CFC11 eq]	Ecotoxicidade Terrestre [kg 1,4-DCB]	Toxicidade Humana [kg 1,4-DCB]
Produção de PP	3,37E+00	7,00E-03	1,00E-04	2,46E+00	7,73E-09	2,70E-02	1,97E-01
Trituração no moinho	1,20E-02	4,39E-05	4,80E-06	3,00E-03	6,10E-09	4,90E-02	1,00E-02
Secagem na estufa	5,77E+00	1,00E-02	1,20E-02	1,38E+00	6,89E-07	6,23E+00	1,22E+01
Moldagem por injeção	2,05E+00	8,00E-03	1,00E-03	7,18E-01	9,96E-07	2,22E+00	2,11E+00

Os valores apresentados na Tabela 4.1 para cada categoria de impacto são gerados a partir da equivalência em massa de produto baseado na unidade funcional e fluxo de referência (detalhados na seção 4.2.1) com a emissão de gases ou uso de recursos não renováveis a partir do método ReCiPe 2016 midpoint.

Este método é utilizado para gerar os valores que são demonstrados nos Anexos A, B, C, D, E, F e G. Os gráficos são gerados pelo próprio software que indica qual a etapa do ciclo de vida, dentro da fronteira do sistema, que tem maior contribuição em cada categoria de impacto.

Cada categoria de impacto possui uma consequência diferente no meio ambiente e na saúde humana e dos ecossistemas, a depender de quão nocivo e expressivo é aquela emissão a partir dos fatores de equivalência.

No potencial de aquecimento global, a emissão de uma gás de efeito estufa (kg) leva a um aumento na concentração de gases de efeito estufa na atmosfera (ppb), que gera um aumento na capacidade de forçamento radioativo (W/m^2) levando, assim, a um aumento na temperatura média global ($^{\circ}C$). Este aumento de temperatura resulta em danos à saúde humana, ecossistemas terrestres e aquáticos. Cada um dos GEEs tem diferentes aspectos de tempo de vida útil na atmosfera (HUIJBREGTS, 2017).

A deposição atmosférica de substâncias inorgânicas como sulfatos, nitratos e fosfatos causam uma mudança na acidez do solo. Para a maioria das plantas existe um intervalo de acidez do solo e um desvio deste padrão pode ser danoso. Como resultado, a acidificação pode gerar alterações na ocorrência de determinadas espécies, o que tem consequências para ecossistemas inteiros.

A eutrofização da água ocorre devido à deposição de nutrientes no solo ou em espaços de água doce que geram uma mudança no balanço de compostos como fósforo e nitrogênio. Os impactos disso seguem uma sequência de etapas que se relacionam com o aumento de organismos autotróficos como algas e cianobactérias e heterotróficos como peixes e outros invertebrados. Isto leva a uma perda relativa de espécies.

Para a categoria de impacto de escassez de recursos fósseis, a modelagem dos danos está subdividida em algumas etapas. É assumido que, com a escassez dos recursos fósseis, é observado um aumento nos custos devido às mudanças nas técnicas de extração, como reaproveitamento de petróleo, ou uma mudança de fonte para uma localização mais dispendiosa, como regiões Árticas, segundo Ponsioen et al. (2014 *apud* HUIJBREGTS, 2017), isto leva a um aumento potencial do custo, que é usado como indicador para esta categoria de impacto.

Para a depleção da camada de ozônio, a emissão substâncias que capturam o ozônio levam a danos na saúde humana por conta do aumento da radiação UVB. Elementos químicos que danificam a camada de ozônio têm grupos de moléculas de cloro ou bromo que interagem com o ozônio na estratosfera. Este esgotamento do ozônio possibilita a entrada de uma maior parcela da radiação UVB na Terra, que afeta a saúde humana com a maior incidência de câncer de pele e catarata (HUIJBREGTS, 2017).

A caracterização dos fatores de ecotoxicidade terrestre e toxicidade humana leva em conta a persistência ambiental, acumulação na cadeia de alimentos humana e toxicidade de um químico (destino, exposição e efeito). Estes fatores estão diretamente relacionados ao potencial desaparecimento de espécies e, conseqüentemente, danos em ecossistemas e danos à saúde humana através do aparecimento de doenças advindas da ingestão destes químicos.

Após isso, foi feito um gráfico reunindo todas as categorias de forma percentual para melhor visualização da contribuição de cada etapa do ciclo de vida com o impacto total de cada categoria, como pode ser visto na Figura 4.4.

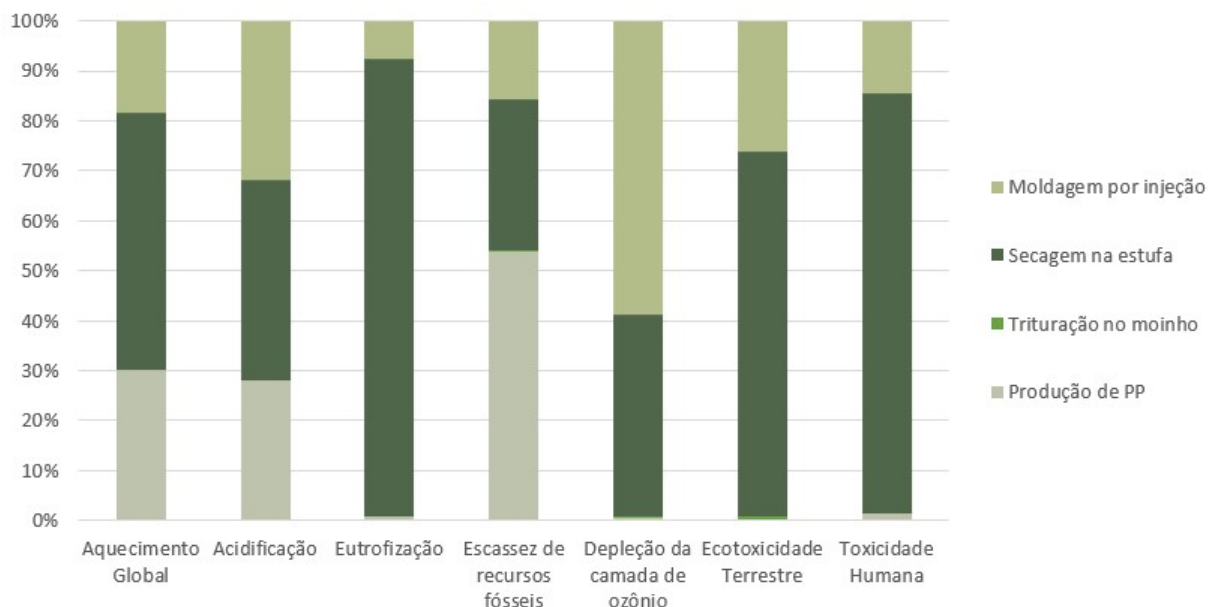


Figura 4.4 - Contribuição relativa das etapas do ciclo de vida do CMP (Fonte: Autora)

O gráfico da Figura 4.4 representa a contribuição relativa de cada etapa do ciclo de vida no total dos impactos do ciclo de vida completo. Foram usados os dados da Tabela 4.1 para gerar as porcentagens de cada categoria de impacto.

A partir deste gráfico é possível observar que, para a maior parte das categorias de impacto (aquecimento global, acidificação, eutrofização, ecotoxicidade terrestre e toxicidade humana), a secagem em estufa foi a que teve a maior contribuição por conta da alta demanda por energia elétrica.

Já na categoria de escassez de recursos fósseis, a produção de polipropileno teve maior impacto por conta da utilização de petróleo para obtenção das matérias primas (monômeros) que dão origem a ele e as reações de polimerização. Com relação à categoria de depleção da camada de ozônio, o processo de injeção plástica teve a maior contribuição devido às emissões de óxido nitroso para a atmosfera.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1. CONCLUSÃO

A partir dos dados apresentados neste trabalho e após a finalização das análises foi possível estabelecer aspectos relevantes sobre a produção do compósito de madeira plástica a base de madeira de endocarpo de tucumã e polipropileno. Os principais consumos e emissões responsáveis por cada categoria de impacto são:

- **Acidificação:** A secagem em estufa foi responsável por 39,93% dos impactos em acidificação devido ao consumo de energia. O processo que contribui para os impactos na produção de energia elétrica é o de fabricação dos fios de cobre para transmissão e distribuição de energia. A moldagem por injeção contribuiu com 31,94% também devido ao consumo de energia.
- **Aquecimento Global:** A secagem em estufa foi responsável por 51,54% dos impactos devido ao consumo de energia. Isso se deve a produção de eletricidade a partir de usina hidrelétrica e a queima de gás natural e carvão em usinas termelétricas. Na produção de energia hidrelétrica ocorrem emissões de substâncias como dióxido de carbono, monóxido de carbono e metano pela mudança no uso da terra no processo de construção de hidroelétricas (de florestas para reservatórios). A produção de polipropileno respondeu por 30,08% dos impactos, devido ao processo de polimerização industrial com o uso de base fóssil.
- **Eutrofização:** A secagem na estufa contribuiu com 91,57% em função dos efluentes gerados a base de fosfato.
- **Ecotoxicidade Terrestre:** A secagem na estufa foi responsável por 73,04% dos impactos na categoria ecotoxicidade terrestre, devido ao consumo de energia. Os processos relacionados à produção de energia, responsáveis pelos impactos nestas categorias são também os relacionados a extração de cobre.
- **Escassez de recursos fósseis:** A produção do polipropileno apresentou predominância nesta categoria, sendo responsável por 53,95%, devido ao uso de

petróleo bruto e gás natural. A secagem na estufa foi responsável por 30,25% deste impacto.

- Depleção na camada de ozônio: A moldagem por injeção contribui com 58,65% dos impactos para a depleção da camada de ozônio, devido à emissão para o ar de monóxido de dinitrogênio. A secagem na estufa contribuiu com 40,54% dos impactos em virtude do consumo de energia. O processo que contribui para os impactos da cadeia de produção de energia é a queima de gás natural em usinas termelétricas.
- Toxicidade Humana: A secagem em estufa do painel contribuiu com 84,06% devido ao consumo de energia. Os processos relacionados à produção de energia que foram responsáveis pelos impactos nesta categoria foram transmissão e distribuição de energia devido à extração de cobre em refinaria que é utilizado na fabricação dos fios de transmissão de energia. A extração de cobre gera rejeitos sulfídricos que são tóxicos.

De modo geral, conforme observado na análise de impacto, a secagem em estufa foi, em grande parte das categorias, a etapa do ciclo de vida do compósito de madeira plástica que teve maior participação nos valores totais, devido ao seu alto consumo de energia. Sendo assim, para reduzir os impactos ambientais da produção do compósito de madeira plástica em questão, é necessário atuar diretamente nesta etapa de secagem em estufa.

Um estudo foi feito na Universidade Federal da Paraíba (LEITE et al., 2017) que apresenta a Avaliação do Ciclo de Vida comparativa entre a produção e uso de uma estufa de secagem elétrica e um secador solar e demonstrou que existem ganhos ambientais significativos com esta alternativa.

Verificou-se que, através do estudo da bibliografia encontrada sobre a Avaliação do Ciclo de Vida, as normas ISOs, além do uso de metodologia científica e estudos de casos similares foi possível desenvolver uma metodologia para aplicar à produção do compósito de madeira plástica à base de pET e PP.

A utilização do *software* e base de dados para mensurar os impactos ambientais também foram imprescindíveis para atingir os objetivos deste trabalho de pesquisa, uma vez que se caracterizam como método padrão para tal atividade.

O presente trabalho também proporcionou um desenvolvimento técnico e acadêmico na área estudada, considerando que se trata de uma metodologia muito útil à gestão ambiental, assim como terá importância para trabalhos futuros.

5.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Sugere-se para trabalhos futuro uma apresentação de ACV para a produção de um composto de madeira plástica de mesma carga com o polímero virgem e comparar os impactos ambientais com os resultados deste trabalho e apresentar a ACV para a produção de outro composto de madeira plástica de diferente composição, simulando diferentes proporções de massa para madeira e termoplástico observando como se dá a variação de cada categoria de impacto.

REFERÊNCIAS

ANDRADE, Maria Margarida de. Introdução a Metodologia do Trabalho Científico. 3ª Ed. São Paulo: Atlas, 2000. 172 p.

GIL, Antonio Carlos et al. Como elaborar projetos de pesquisa. São Paulo: Atlas, 2002.

LAKATOS, MARCONI, 1994. Metodologia científica. 2.ed. São Paulo: Atlas, 1994.

MAYERHOFF, Zea Duque Vieira Luna. Uma análise sobre os estudos de prospecção tecnológica. Cadernos de prospecção, v. 1, n. 1, p. 7-9, 2008.

RICHARDSON, Roberto Jarry. Pesquisa social: métodos e técnicas. São Paulo: Atlas, 1989.

RODRIGUES, William Costa et al. Metodologia científica. Faetec/IST. Paracambi, p. 01-20, 2007.

SEVERINO, Antônio Joaquim. Metodologia do Trabalho Científico/Antônio Joaquim Severino—22. São Paulo: Cortez, 2012.

CALVACANTI, Clóvis. Desenvolvimento e natureza: estudos para uma sociedade sustentável. Cortez; Fundação Joaquim Nabuco, 1995.

DA VEIGA, José Eli. O prelúdio do desenvolvimento sustentável. Economia brasileira: perspectivas do desenvolvimento. São Paulo: CAVC, p. 243-266, 2005.

VIZEU, Fabio; MENEGHETTI, Francis Kanashiro; SEIFERT, Rene Eugenio. Por uma crítica ao conceito de desenvolvimento sustentável. Cadernos Ebape. br, v. 10, n. 3, p. 569-583, 2012.

RANDERS, Jorgen et al. Transformation is feasible: How to achieve the sustainable development goals within planetary boundaries. A report to the Club of Rome, for its 50 years anniversary, v. 17, 2018.

SCIENTIFIC APPLICATIONS INTERNATIONAL CORPORATION (SAIC); CURRAN, Mary Ann. Life-cycle assessment: principles and practice. 2006.

IBICT. Histórico da ACV. Disponível em: <<https://acv.ibict.br/acv/historico-da-acv/>>. Acesso em 17 de maio de 2021.

JOUNG, Che B. et al. Categorization of indicators for sustainable manufacturing. *Ecological indicators*, v. 24, p. 148-157, 2013.

KROTSCHHECK, Christian; NARODOSLAWSKY, Michael. The Sustainable Process Index a new dimension in ecological evaluation. *Ecological engineering*, v. 6, n. 4, p. 241-258, 1996.

MASCLE, Christian; ZHAO, Hong Ping. Integrating environmental consciousness in product/process development based on life-cycle thinking. *International Journal of Production Economics*, v. 112, n. 1, p. 5-17, 2008.

NASCIMENTO, Elimar Pinheiro do. Trajetória da sustentabilidade: do ambiental ao social, do social ao econômico. *Estudos avançados*, v. 26, n. 74, p. 51-64, 2012.

LOUREIRO, Solange Maria; PEREIRA, Vera Lúcia; PACHECO, W. A. A sustentabilidade e o desenvolvimento sustentável na educação em engenharia. *Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental*, v. 20, n. 1, p. 306-324, 2016.

SENA, A. M. C. et al. Desenvolvimento Sustentável e a Abordagem Grassroots: delineando caminhos convergentes. *Anais do Encontro Internacional sobre Gestão Empresarial e Meio Ambiente*, São Paulo, SP, Brasil, v. 16, 2014.

ELKINGTON, John. Partnerships from cannibals with forks: The triple bottom line of 21st-century business. *Environmental quality management*, v. 8, n. 1, p. 37-51, 1998.

SEO, Emilia Satoshi Miyamaru; KULAY, Luiz Alexandre. Avaliação do ciclo de vida: ferramenta gerencial para tomada de decisão. *Interfacehs*, v. 1, n. 1, 2006.

SCIENTIFIC APPLICATIONS INTERNATIONAL CORPORATION (SAIC); CURRAN, Mary Ann. *Life-cycle assessment: principles and practice*. 2006.

JOUNG, Che B. et al. Categorization of indicators for sustainable manufacturing. *Ecological indicators*, v. 24, p. 148-157, 2013.

KROTSCHHECK, Christian; NARODOSLAWSKY, Michael. The Sustainable Process Index a new dimension in ecological evaluation. *Ecological engineering*, v. 6, n. 4, p. 241-258, 1996.

OECD CEI (2003), “*OECD Environmental Indicators: Development, Measurement and Use*,” OECD Environmental Performance and Information Division. Disponível em: <<https://www.oecd.org/env/indicators-modelling-outlooks/24993546.pdf>>. Acesso em 26 de maio de 2021.

UN-CSD (the United Nations Committee on Sustainable Development) (2007), *Indicators of Sustainable Development: Guidelines and Methodologies (3rd Eds.)*, the United Nations, New York, New York. Disponível em: <<https://www.un.org/esa/sustdev/natlinfo/indicators/guidelines.pdf>>. Acesso em 26 de maio de 2021.

VAN BELLEN, Hans Michael. Indicadores de sustentabilidade: uma análise comparativa. FGV editora, 2005.

KIELING, A.; PEREIRA, S.; DOS SANTOS, Maria Cristina. Compósitos de madeira plástica: considerações gerais. *Scientia Amazonia*, v. 8, n. 1, p. B1-B14, 2019.

WOLCOTT, Michael P.; ENGLUND, Karl. A technology review of wood-plastic composites. In: 33rd international particleboard/composite materials symposium proceedings. 1999. p. 103-111.

ONU – Organização das Nações Unidas. (1992). Agenda 21. Rio de Janeiro: CMMED.

BORENSTAIN, M. B. COMPÓSITO PLÁSTICO-MADEIRA PRODUZIDOS COM PARTÍCULAS DE Pinus, Eucalyptus E POLIETILENO DE ALTA DENSIDADE (PEAD). Monografia Graduação Engenharia Florestal. Universidade Federal de Viçosa, 2014.

GARDNER, Douglas J.; HAN, Yousoo; WANG, Lu. Wood-plastic composite technology. *Current Forestry Reports*, v. 1, n. 3, p. 139-150, 2015.

NAZÁRIO, Gabriel Fernando et al. Madeira Plástica: Uma Revisão Conceitual. *Revista Engenharia em Ação UniToledo*, v. 1, n. 01, 2016.

MARTINEZ-LOPEZ, Yonny et al. Physico-Mechanical Properties of Wood-Plastic Produced with Forest Species and Thermoplastic Materials. *Floresta e Ambiente*, v. 27, n. 2, 2020.

FARSI, Mohammad. Thermoplastic matrix reinforced with natural fibers: a study on interfacial behavior. Some critical issues for injection molding, p. 225-250, 2012.

SCIENTIFIC APPLICATIONS INTERNATIONAL CORPORATION (SAIC); CURRAN, Mary Ann. Life-cycle assessment: principles and practice. 2006.

SOMMERHUBER, Philipp F. et al. Life cycle assessment of wood-plastic composites: Analysing alternative materials and identifying an environmental sound end-of-life option. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 117, p. 235-248, 2017.

XU, Xun et al. Life cycle assessment of wood-fibre-reinforced polypropylene composites. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 198, n. 1-3, p. 168-177, 2008.

KIELING, Antônio Cláudio et al. Viabilidade técnica e econômica da madeira plástica (wood plastic) produzida com plástico reciclável e endocarpo de tucumã (*Astrocaryum* sp.). 2018.

FREIRE, Ana Lúcia Feitoza. Avaliação do ciclo de vida de painéis obtidos a partir da casca de coco verde. Embrapa Agroindústria Tropical-Tese/dissertação (ALICE), 2015.

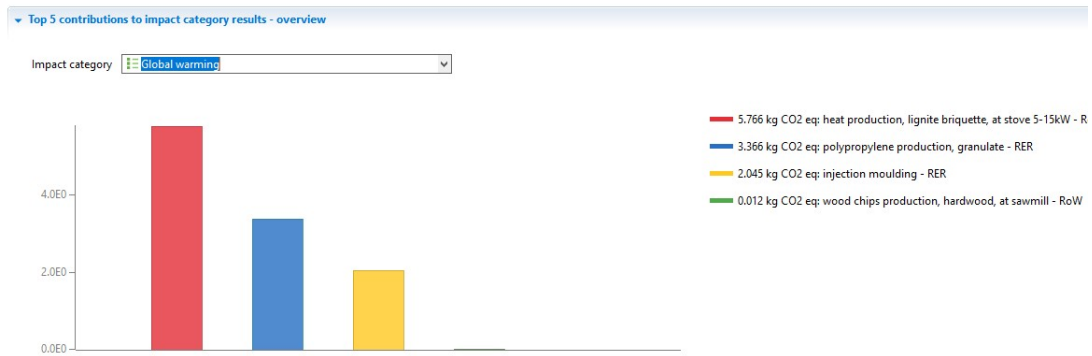
PIEKARSKI, Cassiano Moro et al. Métodos de avaliação de impactos do ciclo de vida: uma discussão para adoção de métodos nas especificidades brasileiras. *Revista Gestão Industrial*, v. 8, n. 3, 2012.

HUIJBREGTS, Mark AJ et al. ReCiPe2016: a harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, v. 22, n. 2, p. 138-147, 2017.

LEITE, Ana et al. Pegada de carbono associada a processos de secagem. *Anais do Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental e Sustentabilidade*, 2017.

ANEXOS

ANEXO A – AICV NO AQUECIMENTO GLOBAL



Fonte: Software OpenLCA

ANEXO B – AICV NA DEPLEÇÃO DO OZÔNIO ESTRATOSFÉRICO



Fonte: Software OpenLCA

ANEXO C – AICV NA ACIDIFICAÇÃO TERRESTRE



Fonte: Software OpenLCA

ANEXO D – AICV NA ECOTOXICIDADE TERRESTRE



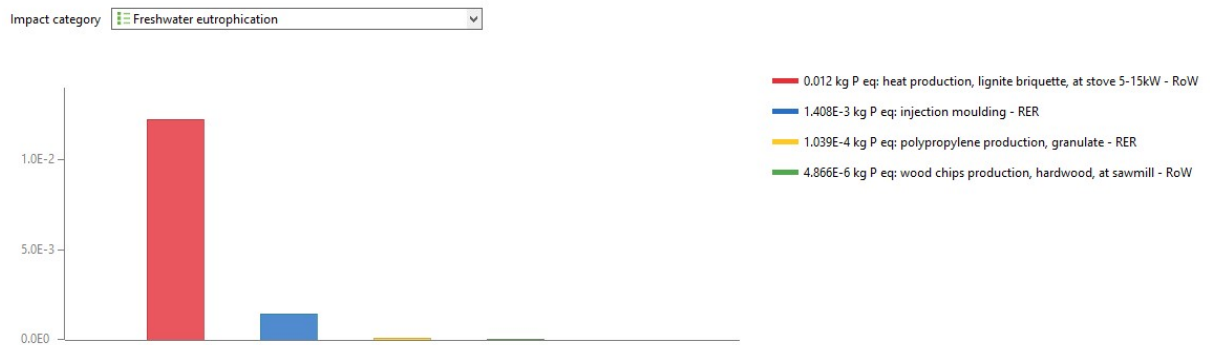
Fonte: Software OpenLCA

ANEXO E – AICV NA ESCASSEZ DE RECURSOS FÓSSEIS



Fonte: Software OpenLCA

ANEXO F – AICV NA EUTROFIZAÇÃO



Fonte: Software OpenLCA

ANEXO G – AICV NA TOXICIDADE HUMANA



Fonte: Software OpenLCA