

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

TAMIRES DE ALMEIDA SFEIR

AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DA PRODUÇÃO DE *PELLETS* DE
MADEIRA UTILIZANDO O SOFTWARE LIVRE OpenLCA

CURITIBA

2013

TAMIRES DE ALMEIDA SFEIR

AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DA PRODUÇÃO DE *PELLETS* DE
MADEIRA UTILIZANDO O *SOFTWARE* LIVRE OpenLCA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à disciplina AT063 – Estágio Profissionalizante em Engenharia Industrial Madeireira como requisito parcial à conclusão do Curso Engenharia Industrial Madeireira, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Profº. Dr. Dimas Agostinho da Silva

Co-orientador: Dr. Emílio Graciliano Ferreira Mercuri

CURITIBA

2013

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Salim e Gisela, por dedicarem tanto esforço, tempo e amor em minha criação e educação.

Ao meu orientador Prof. Dr. Dimas Agostinho da Silva, pelas boas conversas, pela paciência, incentivo e doação de seus conhecimentos e experiências.

Aos meus amigos, em especial à Mariana Malagurti e Rodrigo Simetti, pela confiança, pelos momentos de descontração, alegria e insegurança compartilhados.

À Patricia, pelo afeto incondicional.

À Timber Creek Farms na obtenção de dados e esclarecimento sobre o processo estudado.

Ao Laboratório de Energia de Biomassa - UFPR, pelo período de monitoria e pesquisa.

À Universidade Federal do Paraná pelo conhecimento.

RESUMO

A busca por fontes alternativas e ambientalmente sustentáveis de energia tem estimulado a pesquisa e desenvolvimento no campo energético. O setor florestal tem como opção para melhoria de sua baixa eficiência energética, a densificação da biomassa florestal, gerando produtos conhecidos por *pellets* e briquetes. Porém, o fato de ser uma alternativa para resíduos gerados não implica em um melhor desempenho ambiental. Para o estudo deste desempenho são utilizadas ferramentas de análise como a Avaliação de Ciclo de Vida (ACV). Neste contexto, o objetivo deste estudo foi realizar a ACV da produção de *pellets* de madeira, produzidos em uma indústria localizada na cidade de Piên, Paraná. Para esta avaliação foi utilizado o *software* livre *openLCA*, e feita a avaliação dos impactos do ciclo de vida por meio de dois métodos de Avaliação de Impacto de Ciclo de Vida(AICV): Eco-Indicator 99 e CML 2001. A ACV mostrou-se uma ferramenta útil na avaliação de sistemas de produção. Sendo a indústria de *pellets* de base florestal, um dos maiores impactos encontrados pela ACV está no uso do solo.

Palavras-Chave: Avaliação de Ciclo de Vida. *Pellets* de madeira. Biomassa.

ABSTRACT

The search for alternative sources and environmentally sustainable energy has stimulated research and development in the energy field. The forestry sector has the option to improve their low energy efficiency by doing the densification of forest biomass, creating products known as pellets and briquettes. However, the fact of being an alternative to waste generated, does not imply a better environmental performance. For the study of this performance are usually used analysis tools such as Life Cycle Assessment (LCA). In this context, the aim of this study was to do a LCA of wood pellets production, produced in a industry located at Piên, Paraná. For this evaluation, was used the free software openLCA, and performed the assessment of the impacts of the life cycle by two methods of Life Cycle Impact Assessment (LCIA): Eco-Indicator 99 and CML 2001. The LCA proved to be a useful tool in the evaluation of production systems. As pellets production are a forest-based industry one of the greatest impacts found by ACV is in land use.

Keywords: Life Cycle Assessment. Wood pellets. Biomass.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 – NÚMERO DE ARTIGOS CIENTÍFICOS EM QUE SE ENCONTROU O TERMO “LIFE CYCLE ASSESSMENT” NO SCIENCE DIRECT.....	10
FIGURA 2 – <i>PELLETS</i> DE MADEIRA.....	15
FIGURA 3 – FLUXOGRAMA DO PROCESSO PRODUTIVO DOS <i>PELLETS</i>	16
FIGURA 4 – MATRIZ FORMADORA PARA PRODUÇÃO DOS <i>PELLETS</i>	18
FIGURA 5 – CADEIA DE IMPACTOS CAUSADOS PELA EMISSÃO DE UMA SUBSTÂNCIA.....	22
FIGURA 6 – FASES DE UMA ANÁLISE DE CICLO DE VIDA.....	25
FIGURA 7 – SISTEMA DE PRODUTO DEFINIDO PARA A PRODUÇÃO DE <i>PELLETS</i> DE MADEIRA.....	27
FIGURA 8 – PROCEDIMENTO GERAL DE CÁLCULO DO ECO-INDICATOR 99. AS CAIXAS EM BRANCO REFEREM-SE A PROCEDIMENTOS E AS CAIXAS HACHURADAS REFEREM-SE A RESULTADOS INTERMEDIÁRIOS.....	36
FIGURA 9 – CONTRIBUIÇÃO DOS PROCESSOS DA CADEIA DE SUPRIMENTOS DA PRODUÇÃO DE <i>PELLETS</i> DE MADEIRA NAS PRINCIPAIS CATEGORIAS DE IMPACTO AVALIADAS, MÉTODO ECO-INDICATOR 99.....	43
FIGURA 10 - CONTRIBUIÇÃO DOS PROCESSOS DA CADEIA DE SUPRIMENTOS DA PRODUÇÃO DE <i>PELLETS</i> DE MADEIRA NAS PRINCIPAIS CATEGORIAS DE IMPACTO AVALIADAS, METODO CML 2001.....	44

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - PARÂMETROS UTILIZADOS PELO PROCESSO DE REFERÊNCIA UTILIZADO.....	31
TABELA 2 – INVENTÁRIO DO CICLO DE VIDA DO PROCESSO PRODUTIVO DE <i>PELLETS</i> DE MADEIRA.	39
TABELA 3 – FLUXOS DE SAÍDA REFERÊNTES À PRODUÇÃO DE 6000 T DE <i>PELLETS</i> DE MADEIRA.	41
TABELA 4 – VALORAÇÃO DAS CATEGORIAS DE IMPACTO AMBIENTAL DA PRODUÇÃO DE <i>PELLETS</i> DE MADEIRA PARA O MÉTODO ECO-INDICATOR 99.....	42
TABELA 5 - VALORAÇÃO DAS CATEGORIAS DE IMPACTO AMBIENTAL DA PRODUÇÃO DE <i>PELLETS</i> DE MADEIRA PARA O MÉTODO CML 2001	42

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	8
1.2	OBJETIVOS DO TRABALHO	12
1.3	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	12
2	REVISÃO DE LITERATURA.....	14
2.1	<i>PELLETS</i> DE MADEIRA	14
2.1.1	Produção de <i>Pellets</i> de Madeira.....	15
2.2	AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA.....	18
2.2.1	Métodos para Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (AICV)	20
2.2.2	<i>Softwares</i> de apoio à Avaliação de Ciclo de Vida.....	23
3	METODOLOGIA.....	25
3.1	ESTRUTURA DA ANÁLISE DE CICLO DE VIDA.....	25
3.2	DEFINIÇÃO DO OBJETIVO E DO ESCOPO – FASE 1	26
3.2.1	Visita à empresa.....	26
3.2.2	SISTEMA DE PRODUTO, FRONTEIRA DO SISTEMA E UNIDADE FUNCIONAL.....	27
3.2.3	<i>Software</i> de apoio à ACV	28
3.2.4	Banco de dados: BioEnergieDat.....	28
3.2.5	Processo de referência	29
3.2.6	Métodos de AICV	35
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	38
4.1	INVENTÁRIO DE CICLO DE VIDA (ICV) DE <i>PELLETS</i> DE MADEIRA – FASE 2	38
4.2	AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS DO CICLO DE VIDA (AICV) – FASE 3..	41
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	45
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	46

1 INTRODUÇÃO

Com o crescente desenvolvimento econômico e tecnológico o cenário energético tornou-se um tema amplamente discutido, especialmente após a Crise do Petróleo, em 1973. Este evento estimulou a revisão das políticas energéticas empregadas ao redor do mundo, fazendo com que os países buscassem: maneiras alternativas na produção de energia, o aumento da cooperação internacional e o uso de fontes de menor impacto ambiental.

A biomassa ocupa posição importante nestas políticas, pois, mesmo em relação às demais fontes renováveis de energia, apresenta custos relativamente baixos. De acordo com Nogueira e Lora (2003), o termo biomassa abrange toda a matéria vegetal gerada através da fotossíntese e derivados, como por exemplo, os resíduos florestais e agrícolas.

Como matriz energética mundial, a participação deste material varia de acordo com a região considerada, sendo afetada por diversas variáveis, como: o nível de desenvolvimento do país, disponibilidade, questões ambientais e potencial competitivo com relação a outras fontes (petróleo, hidroeletricidade, energia nuclear, etc.) (BRITO, 2007). Uma das características inerentes à biomassa de origem florestal é sua baixa eficiência, que pode ser melhorada através da densificação deste material com a pelletização ou briquetagem, melhorando também fatores como transporte e armazenagem. Mesmo sendo uma fonte menos impactante ambientalmente, se comparada aos derivados de petróleo, a produção de biomassa energética, incluindo os *pellets*, pode gerar pressões ambientais. Assim faz-se necessário a utilização de ferramentas de gerenciamento que permitam a avaliação e o controle das interações do processo produtivo com o meio ambiente.

O desenvolvimento de tecnologias energéticas baseadas em biomassa florestal aumenta o potencial de sustentabilidade do setor florestal, pois a geração de resíduos é uma característica intrínseca das cadeias produtivas deste setor. Estes resíduos necessitam de gestão adequada para que não haja contaminação do meio ambiente por meio deles, logo, a compactação e homogeneização deste material gera impactos positivos, viabilizando a utilização de um possível passivo

ambiental (GARCIA, 2010). A densificação de resíduos de madeira em pellets para o aquecimento de água e residências tem sido praticada na Europa desde a década de 1970. Estima-se que atualmente existam cerca de 500.000 fornos de pellets queimando um total de 650.000 toneladas do material por ano na América do Norte (MAGELLI *et al*, 2008).

No entanto, mesmo que a queima da biomassa seja considerada neutra nas emissões de carbono (PA *et al*, 2013) não significa que ela seja melhor em todas as categorias, como dano à saúde humana, redução de biodiversidade, se comparadas a diferentes materiais energéticos. Alguns estudos indicam que os impactos causados à saúde humana, resultante da combustão da biomassa (madeira) para o aquecimento residencial podem ser maiores que os causados pela queima de gás natural (PA *et al*, 2013).

Neste contexto, a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) pode ser aplicada para avaliar a sustentabilidade ambiental e energética das cadeias de suprimento da biomassa, sendo uma ferramenta importante para a documentação e análise ambiental do produto ou processo e podendo fazer parte das tomadas de decisões sustentáveis.

A ACV surgiu com a necessidade de uma metodologia que facilitasse a análise dos impactos ambientais, incluindo todas as etapas do ciclo de vida de um produto ou processo, desde a extração da matéria-prima, fabricação, transporte, embalagem, uso, podendo chegar até a reciclagem ou disposição final (CARVALHO, 2008). O interesse no desenvolvimento de pesquisas que abordem o assunto tem aumentado gradativamente ao longo dos anos. Em estudo realizado por Lima (2007) observou-se o aumento do número de artigos publicados em revistas acadêmicas mantidas no banco de dados “*Science Direct*” (Figura 1).

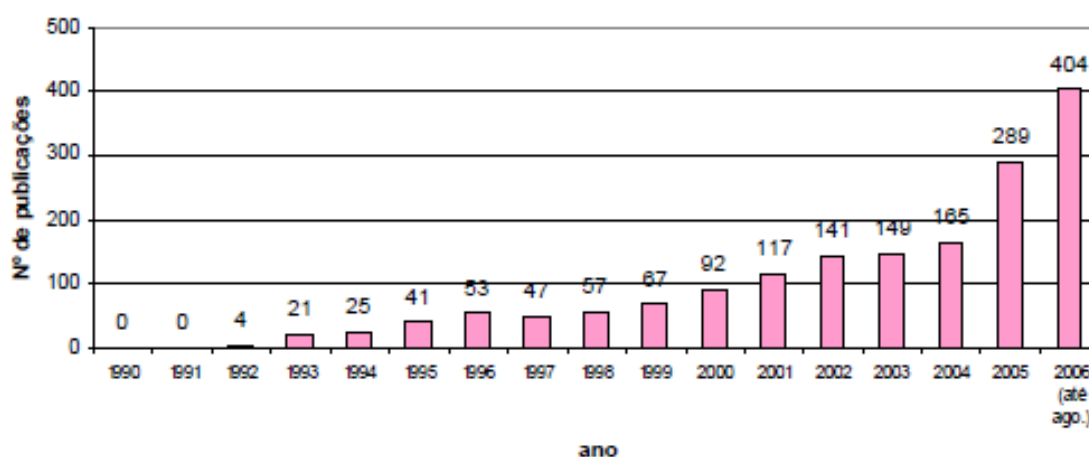


FIGURA 1 – NÚMERO DE ARTIGOS CIENTÍFICOS EM QUE SE ENCONTROU O TERMO “LIFE CYCLE ASSESSMENT” NO SCIENCE DIRECT.
FONTE: LIMA (2007)

Este mesmo estudo mostra a quantidade de dissertações de mestrado e teses de doutorado publicadas sobre o assunto por cursos de pós-graduação brasileiros até o ano de 2007, conforme o Quadro 1:

Universidade	Número de Dissertações sobre ACV	Número de teses sobre ACV
Universidade de São Paulo – USP	13	4
Universidade Federal de Santa Maria – UFSM	4	-
Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS	4	-
Universidade Regional de Blumenau – FURB	4	-
Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC	3	1
Universidade de Brasília – UnB	3	-
Universidade Federal da Bahia – UFBA	2	-
Universidade Federal de São Carlos - UFSCAR	2	2
Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ	2	1
Universidade Federal do Paraná – UFPR	1	-
Universidade para Desenvolvimento do Estado e da Região do Pantanal - UNIDERP	1	-
Universidade Est. Paulista Júlio de Mesquita Filho/Botucatu – UNESP	1	-
Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP	1	5
Universidade Federal de Viçosa – UFV	1	-

continua

continuação Quadro 1

Universidade	Número de Dissertações sobre ACV	Número de teses sobre ACV
Universidade Federal Fluminense – UFF	1	-
Universidade Metodista de Piracicaba – UNIMEP	1	-
Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI (MG)	1	-
Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – PUC	1	-
Universidade de Taubaté – UNITAU	1	-
Universidade Federal do Pará (UFPA)	-	2
Universidade Federal de Minas Gerais	-	1

QUADRO 1 – NÚMERO DE DISSERTAÇÕES E TESES PUBLICADAS EM UNIVERSIDADES.
 FONTE: LIMA (2007).

Dessa forma, produzir conhecimento sobre a metodologia de ACV e sobre as características ambientais relacionadas à produção de *pellets* de madeira contribui para o desenvolvimento da matriz energética atual, seus possíveis impactos e fornece ferramentas de gestão ambiental, de forma a se obter um mundo ecologicamente mais estável.

1.2 OBJETIVOS DO TRABALHO

O presente trabalho tem como objetivo aplicar a metodologia de avaliação do ciclo de vida para a produção de pellets de madeira. Para que esse objetivo se alcance foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- Construir o inventário de ciclo de vida (ICV) da produção de *pellets* de madeira;
- Realizar a avaliação de impactos do ciclo de vida (AICV) do processo por meio dos métodos Eco-indicator 99 e CML 2001, identificando qualitativamente os processos que mais contribuem negativamente para a manutenção da qualidade de vida;
- Obter a capacitação técnica na utilização da ferramenta OpenLCA.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O conteúdo deste trabalho foi dividido em cinco (5) capítulos, sucintamente descritos a seguir:

O capítulo 1, situa o leitor sobre o contexto sobre o qual o trabalho foi elaborado, apresentam-se os objetivos e justificativa para a realização do mesmo.

No capítulo 2, foi realizada uma revisão de literatura sobre *pellets* de madeira, o que são a origem do processo produtivo bem como a descrição de sua produção. Em seguida, fez-se uma revisão sobre a metodologia de ACV, definição, normas, métodos de AICV, softwares de apoio à ACV. Em suma, são abordados os principais conceitos necessários para a compreensão da obra.

O capítulo 3, aborda a metodologia utilizada para a elaboração do trabalho.

No capítulo 4, são apresentados os resultados obtidos da análise de ciclo de vida do processo de pelletização com a utilização da ferramenta OpenLCA. No mesmo capítulo são discutidos os resultados.

Por fim, o capítulo 5, contém as considerações finais sobre os objetivos do trabalho, concluindo a pesquisa e oferecendo sugestões para futuros estudos.

2 REVISÃO DE LITERATURA

A seguir são abordados os principais conceitos necessários para o desenvolvimento e compreensão do presente trabalho.

2.1 PELLETS DE MADEIRA

Pellets por definição são combustíveis orgânicos de forma cilíndrica, produzidos através do adensamento da biomassa, com teor de umidade geralmente abaixo de 10%, características que propiciam uma combustão mais uniforme e eficiente (RASGA, 2013). Estas características reduzem as desvantagens da utilização da biomassa como alternativa energética ao uso de carvão, petróleo, etc.

A principal aplicação de *pellets* de madeira é como combustível, utilizado para o aquecimento de ambientes internos residenciais, aquecimento de água e em uma escala maior de consumo para a produção de energia elétrica (JENKINS, 2010). No entanto diferentes usos, além do energético, têm sido descritos, como exemplo cita-se a utilização em camas para animais, desodorizador de geladeiras e até preventivo à dengue – quando aplicado em pratinhos de vasos (SILVA *et al*, 2012)

A tecnologia do *pellet* de madeira foi criada na Suécia na década de 1980 como uma forma eficiente para utilização dos resíduos de madeira industrial (RMI) do país na busca por um combustível alternativo a ser utilizado no aquecimento industrial e residencial, e desde então seu desenvolvimento evoluiu rapidamente (JENKINS, 2010).

A pelletização de madeira consiste então em uma alternativa tecnológica para utilização dos resíduos gerados na indústria de base florestal, com o aproveitamento energético deste resíduo.

2.1.1 Produção de *pellets* de madeira

A produção de *pellets* de madeira é um trabalho extenuante e que pode possuir barreiras comerciais. No entanto os últimos anos trouxeram grandes avanços tecnológicos no processo de transformação de biomassa de menor qualidade energética em biocombustíveis sólidos de alta qualidade.

Os *pellets* de madeira estão dentro do grupo dos combustíveis de biomassa densificada, o qual inclui também os briquetes de madeira, que são combustíveis sólidos feitos a partir da compressão mecânica da biomassa para o aumento de sua densidade e homogeneização da forma (OBERNBERGER; THEK, 2010).

Para a produção de *pellets* normalmente se utiliza como matéria-prima resíduos da indústria florestal e madeireira, como: serragem, maravalha, aparas, cavacos, etc, que são processadas em plantas industriais e comprimidas em pequenos cilindros de 6,0 a 8,0 mm de diâmetro, e de 10,0 a 40,0 mm de comprimento como pode ser observado na Figura 2 (RASGA, 2013). Como em qualquer processo produtivo, a pelletização de madeira busca uma maior eficiência de produção, por este motivo, nos Estados Unidos e Canadá as indústrias processam em maior quantidade espécies de coníferas (*softwoods*) ao invés de folhosas (*hardwoods*) (GARCIA, 2010).



FIGURA 2 – *PELLETS* DE MADEIRA.
FONTE: JENKINS, 2010, p. 2.

A cadeia produtiva dos pellets tem início com a coleta dos resíduos de madeira ou das toras brutas, seguido pelo seu beneficiamento (pelletização) e embalagem e posterior distribuição. O processo de produção de *pellets* de madeira apresenta as seguintes etapas, presentes na Figura 3:

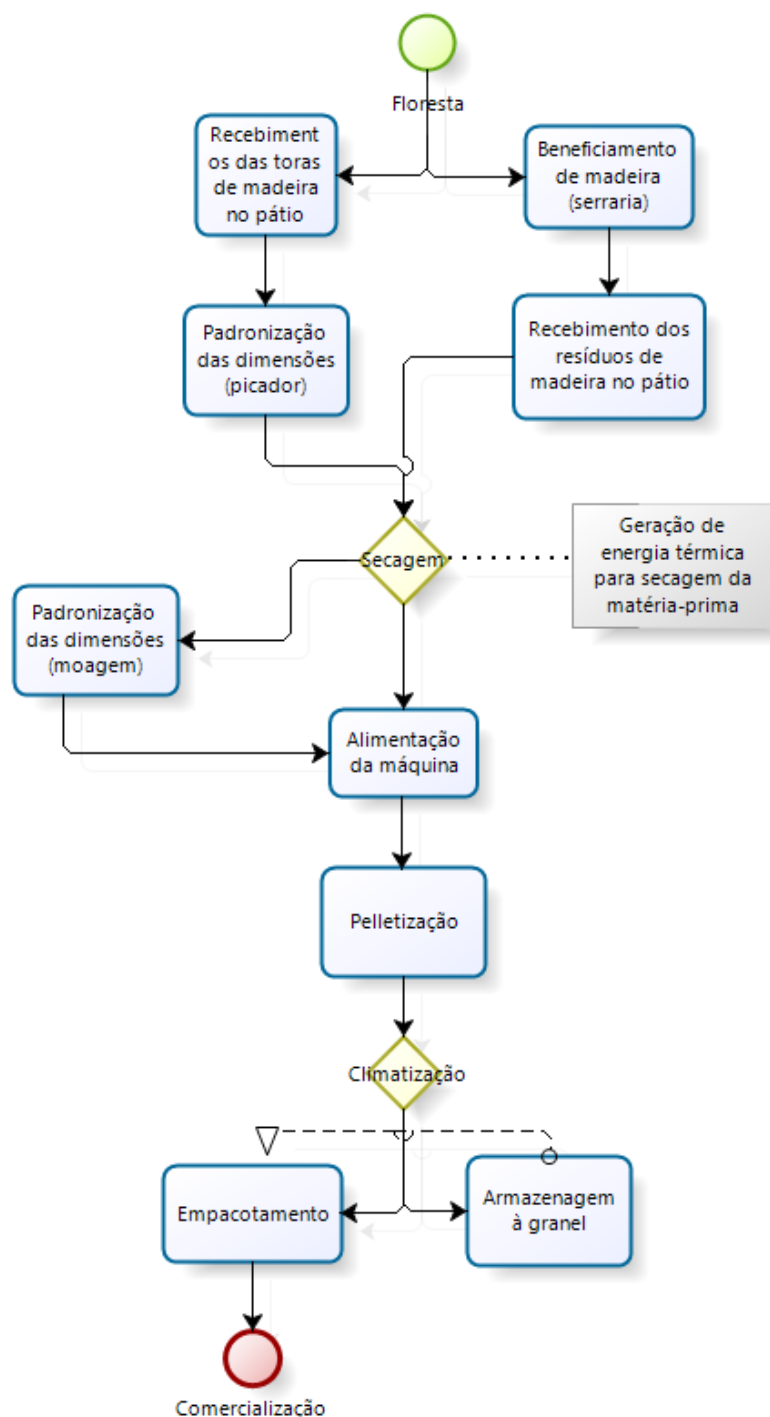


FIGURA 3 – FLUXOGRAMA DO PROCESSO PRODUTIVO DOS PELLETS.
FONTE: A AUTORA (2013).

A matéria prima a ser pelletizada, poderá vir como toras de madeira bruta (recebimento das toras de madeira no pátio) ou como subproduto do processamento da madeira nas indústrias (serrarias, indústrias de painéis, etc.) – recebimento dos resíduos de madeira no pátio. Caso seja recebida na forma bruta a matéria prima é descascada e passa por um primeiro processo de padronização de suas dimensões em um picador, em que é reduzida a partículas menores, tais quais as recebidas das indústrias de beneficiamento. A seguir as partículas seguem para o secador, para que o teor de umidade seja reduzido geralmente 50% para menos de 10% (base úmida) (GARCIA, 2010) aumentando, assim, seu poder calorífico. A secagem garante a redução de perda de vapor na vaporização da água e na dispersão de gases energéticos durante a queima do produto final (RASGA, 2013).

Após a secagem, a matéria prima passa por uma última padronização de suas dimensões, normalmente em um moinho de martelos, em que atingem dimensões que variam de 4mm a 6mm em média. A próxima etapa do processo é a pelletização em si, que ocorre na máquina pelletizadora, também conhecida por extrusora, que consiste em um rolo e uma matriz (Figura 4) que possui um denso arranjo de orifícios. A pressão exercida pelos rolos força a madeira particulada a passar pelos orifícios da matriz, que determinam o diâmetro do material, formando os *pellets*. Com o aumento da pressão e fricção sobre a madeira ocorre também a elevação da temperatura. Este aumento de temperatura promove o amolecimento da lignina, permitindo então a compressão da madeira em pequenos cilindros. Em geral, este calor e a compressão que causam a reorganização da lignina com as fibras são suficientes para a completa coesão do material, sem a necessidade de aditivos. Caso a madeira apresente baixo teor de lignina, é possível que se utilize como elemento ligante o amido. A eficiência das pelletizadoras pode variar, mas em geral, um motor de 100 HP possibilita a produção de 1 (uma) tonelada de *pellets* por hora (JENKINS, 2010).

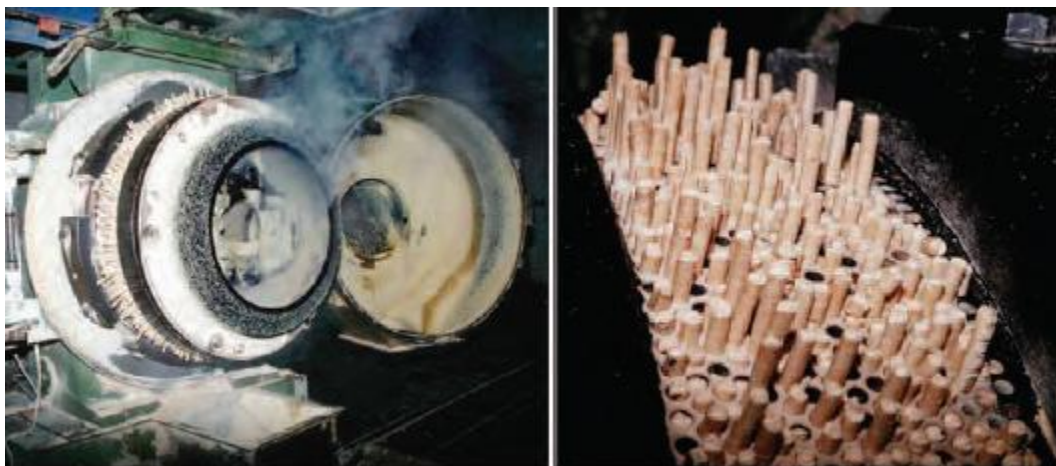


FIGURA 4 – MATRIZ FORMADORA PARA PRODUÇÃO DOS *PELLETS*.
FONTE: GARCIA (2010).

Ao saírem da pelletizadora, os *pellets* estão macios e quentes e precisam passar por uma estação de climatização, ponto crítico na produção dos pellets, pois está relacionado diretamente com a resistência e durabilidade do produto final. Depois de resfriado, o material é transportado por uma peneira vibratória, a fim de garantir que o produto final esteja livre de poeira ou outro material contaminante. Finalmente, o produto está pronto para ser ensacado ou armazenado em silos, para posterior comercialização.

2.2 AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA

A Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) é uma metodologia que avalia sistematicamente a quantificação de fluxos de energia e de materiais associados a um produto ou serviço, ou seja, são determinados, se possível, de forma quantitativa os impactos causados pela retirada de recursos e emissões para o meio ambiente ao longo de seu ciclo de vida (GONÇALVES, 2010).

O principal objetivo da ACV é simplificar sistemas reais e complexos, permitindo o entendimento das interações entre as atividades e o meio na quais estas são desenvolvidas, o impacto causado pelas mesmas, além de permitir a oportunidade para melhoria nos processos utilizados (KEIL, 2012). No Brasil, a ACV

é normalizada pela ABNT¹, em que as normas ISO² da série 14040 foram adaptadas ao cenário do país, nas normas NBR ISO 14040 e 14044 (Quadro 2).

ABNT/CB-38 – Comitê Brasileiro de Gestão Ambiental					
					Válida a partir de
ABNT	NBR	ISO	Gestão Ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura. Esta Norma descreve os princípios e a estrutura de uma avaliação de ciclo de vida (ACV)		21/06/2009
14040:2009					
ABNT	NBR	ISO	Gestão Ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Requisitos e Orientações. Esta Norma especifica os requisitos e provê orientações para a avaliação do ciclo de vida (ACV).		21/06/2009
14044:2009					

QUADRO 2 – NORMAS DA ABNT SÉRIE 14040
FONTE: KEIL, 2012, p. 35, adaptado.

O termo ciclo de vida tem origem biológica e descreve a evolução e decaimento de sistemas biológicos (KEIL, 2012), foi incorporado às atividades produtivas para descrever as mudanças ocorridas durante os processos de transformação industrial em 1990, nos Estados Unidos, como “Life Cycle Assessment” (LCA) (FERREIRA, 2004).

Em linhas gerais, a ACV acrescenta valor ao processo de tomada de decisões pois quantifica o fluxo energético e de material do processo analisado (de produto ou serviço), contribuindo para o aumento da eficiência das etapas deste, melhorando a relação produto-meio ambiente (SALLES, 2009).

¹ ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

² ISO – International Organization for Standardization

2.2.1 Métodos para avaliação de impacto do ciclo de vida (AICV)

A fase de avaliação de impacto do ciclo de vida (AICV), avalia a significância dos potenciais impactos ambientais coletados no inventário, fornecendo informações para a fase de interpretação do ciclo de vida (ABNT, 2009). Muitas metodologias podem ser aplicadas para a AICV e boa parte destes métodos faz uso de cálculos na manipulação dos dados disponíveis fazendo uso de softwares para realizá-los (NIGRI, 2012).

Segundo Ribeiro (2009), não existe um método que seja considerado único ou mais apropriado, sendo vantajosa, inclusive a utilização de mais de um método, para que um maior número de categorias de impactos sejam contemplados. Além do fato de cobrir um maior número de categorias de impactos, a utilização de mais de um método supre a falta de uma metodologia aplicada à realidade brasileira. Pois, mesmo com o desenvolvimento de novas e diferentes metodologias não existe atualmente nenhum método nacional, e os já desenvolvidos, consideram impactos regional/local relativos a regiões específicas de onde foram criados, como Canadá, Estados Unidos e Europa (SILVA, 2012), com exceção das categorias tidas como globais (aquecimento global, depleção da camada de ozônio). Entre os métodos-científicos existentes de AICV, listam-se os mais utilizados e seus países de origem no Quadro 3:

País	Nome	Abordagem
Canadá	LUCAS (A new LCIA Method Used for a Canadian-Specific Context)	<i>midpoint</i>
Dinamarca	EDIP (Environmental Design of Industrial Products)	<i>midpoint</i>
Estados Unidos	TRACI (Tool for the Reduction and Assessment of Chemical and other Environmental Impacts)	<i>midpoint</i>
Holanda	CML (Center for Environmental Science)	<i>midpoint</i>
Holanda/Suíça	Eco-indicator 99	<i>endpoint</i>
Japão	LIME (Life Cycle Impact Assessment Method)	<i>Midpoint/endpoint</i>
	JEPIX (Japan Environmental Policy Priorities)	-
Suécia	EPS (Environmental Priority Strategies)	<i>endpoint</i>
Suíça	IMPACT 2002(+)	<i>Midpoint/endpoint</i>
	Ecopoints	<i>endpoint</i>

QUADRO 3 – PRINCIPAIS MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DE IMPACTO DO CICLO DE VIDA.
 FONTE: LIFE CYCLE INITIATIVE (2012) *apud* SILVA (2012) e PIEKARSKI (2012), adaptado.

Os métodos de AICV são divididos em dois grupos de acordo com sua abordagem: *midpoint* (ponto médio) e *endpoint* (ponto final). As características a

nível *midpoint*, segundo Piekarski *et al* (2012), não representam as consequências ambientais sobre o percurso ambiental das emissões contidas no inventário de ciclo de vida, mas são indicadores de impacto em potencial. Como exemplo de métodos que utilizam esta abordagem tem-se: EDIP, CML e TRACI. Já ao nível *endpoint*, que basicamente caracteriza as consequências geradas das categorias de ponto médio ao seu dano final, como por exemplo o Eco-indicator 99.

Para que o conceito de *midpoint* e *endpoint* possa ser melhor compreendido a Figura 5 ilustra a troca ambiental com um *endpoint*, algo a ser evitado ou protegido. Como exemplo desta cadeia de troca é, de acordo com Takeda (2008), a emissão do gás Clorofluorcarbono (CFC), que causam a depleção da camada de ozônio (*midpoint*), aumentando assim o nível de exposição à radiação (*midpoint*), podendo levar ao aumento da ocorrência de câncer de pele nas pessoas (*endpoint*).

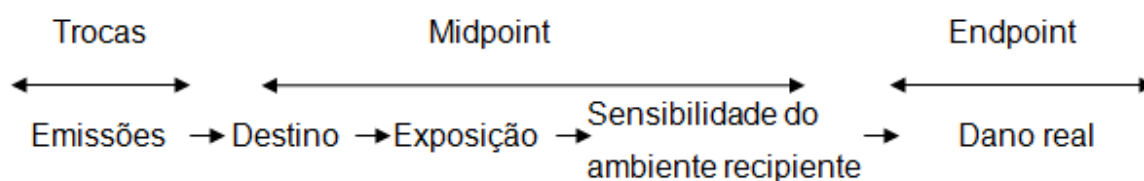


FIGURA 5 – CADEIA DE IMPACTOS CAUSADOS PELA EMISSÃO DE UMA SUBSTÂNCIA.
FONTE: TAKEDA (2008) p. 39, adaptado.

Argumenta-se, que os métodos *midpoint* fornecem resultados mais fiéis e apresentam menor subjetividade, porém, não possuem tanto peso no suporte nas tomadas de decisões, enquanto os *endpoints* são mais facilmente compreensíveis por serem direcionados diretamente ao dano causado pelos impactos avaliados, mas apresentam maior incerteza. Em uma pesquisa sistematizada realizada por Takeda (2008), o método mais utilizado em AICV é o Eco-indicator 99, com 185 citações, seguido pelo Eco-indicator 95 e pelo Impact 2002+ com 37 e 33 citações, respectivamente. Entretanto, o direcionamento na seleção do método e tipo de abordagem, atentando-se a possibilidade da combinação de diferentes métodos que possuam também abordagens distintas, segundo Piekarski *et al* (2012), está na peculiaridade de cada estudo e no estado da arte do produto ou processo estudados.

2.2.2 Softwares de apoio à Avaliação de Ciclo de Vida

Atualmente existe um número considerável de *softwares*, desenvolvidos por centros de pesquisa, universidades e empresas ao redor do mundo que auxiliam no desenvolvimento e execução da ACV de diferentes produtos e serviços. Estes programas computacionais facilitam a manipulação da grande e variada quantidade de dados que uma ACV requer. Entre as vantagens apontadas por Mariotoni *et al* (2007) *apud* Ribeiro (2009) para a utilização destes recursos estão a disponibilização de bancos de dados, reduzindo consideravelmente o tempo despendido com a coleta de dados; realização de avaliação de impactos e suas interpretações e a apresentação dos resultados de forma facilitada através de gráficos e tabelas.

Para a escolha de qual *software* utilizar devem ser considerados alguns aspectos como o financeiro, as atualizações do programa, suporte técnico disponível, tamanho do banco de dados, idioma, possibilidade da edição dos dados originais e a inclusão e documentação de novos dados. Uma lista com alguns dos *softwares* disponíveis no mercado está apresentada no Quadro 4:

Ferramenta	Fornecedor	País
BEES	NIST Building and Fire Research Laboratory	Estados Unidos
Boustead Model 6.0	Boustead Consulting	Reino Unido
CMLCA 5.2	Centre of Environmental Science	Holanda
ECO-it	PRé-Consultants	Holanda
EIO-LCA	Carnegie Mellon University – Green Design Institute	Estados Unidos
EMIS	Carbotech	Suíça

continua

Continuação quadro 4.

Ferramenta	Fornecedor	País
Environmental Impact Estimator	ATHENA Sustainable Materials Institute	Canadá
GaBi	PE International GmbH	Alemanha
GREET	DOE's Office of Transportation	Estados Unidos
KCL-ECO	Ou Keskuslaboratorio-Centrallaboratorium Ab, KCL	Finlândia
MIET	Centre of Environmental Science	Holanda
openLCA	GreenDelta	Alemanha
SimaPro	PRé-Consultants	Holanda
Umberto	Institute for Environmental Informatics	Alemanha
Verdee	ENEA – Italian National Agency for New Technology, Energy and the Environment	Itália

QUADRO 4 – SOFTWARES DE APOIO À ACV.
 FONTE: EPA (2006); RIBEIRO (2009), adaptado.

3 METODOLOGIA

A metodologia utilizada para a elaboração da Avaliação de Ciclo de Vida presente neste trabalho foi definida com base na ferramenta ACV. Inicialmente, definiu-se a estrutura da ACV, em seguida, descrevem-se cada fase da ferramenta aplicada para a referente pesquisa.

3.1 ESTRUTURA DA ANÁLISE DE CICLO DE VIDA

Segundo a norma ABNT NBR ISO 14040 (2009) o processo de ACV é uma avaliação sistêmica composto por quatro fases, demonstradas na Figura 6 e descritas em seguida.

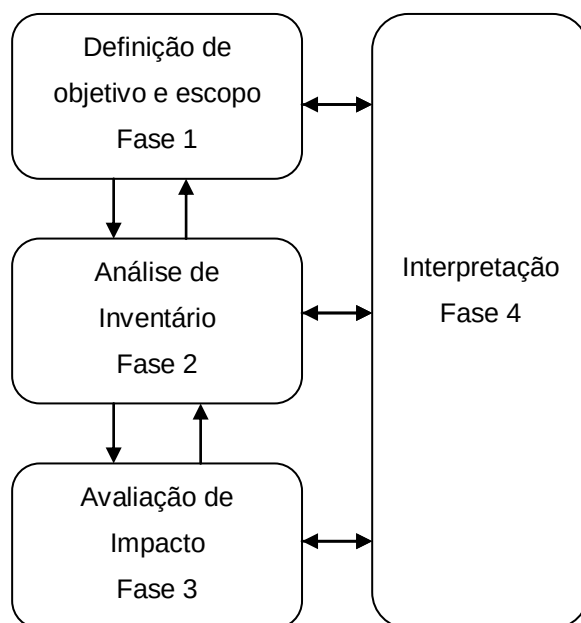


FIGURA 6 – FASES DE UMA ANÁLISE DE CICLO DE VIDA
FONTE: ABNT 14040, 2009.

Fase 1: Definição do objetivo e escopo – Nesta etapa do trabalho foi realizada a definição do planejamento do estudo. Foi estabelecido o contexto em que a avaliação estaria inserida, definiu-se o sistema do produto, bem

como a fronteira deste sistema, unidade-funcional, rotinas, base de dados, além das categorias de impacto ambiental analisadas nesta pesquisa.

Fase 2: Análise de Inventário – Na análise de Inventário de Ciclo de Vida (ICV), foram identificados e analisados os *inputs*, ou seja, os recursos consumidos durante o ciclo de vida do processo, e os *outputs*, que são as descargas ambientais (emissões, disposição de resíduos, etc).

Fase 3: Avaliação de Impacto – Durante a AICV, foram analisadas os efeitos humanos e ecológicos da utilização dos recursos e das descargas ambientais identificadas na análise de inventário.

Fase 4: Interpretação – Nesta fase foram avaliados os resultados obtidos na AICV e na ICV de acordo com o objetivo previamente definido.

3.2 DEFINIÇÃO DO OBJETIVO E DO ESCOPO – FASE 1

Em uma ACV tradicional, definem-se os objetivos do estudo e seu escopo, no entanto, por se tratar de um trabalho de conclusão de curso, os objetivos da pesquisa foram inicialmente definidos no Capítulo 1, assim sendo, delimitou-se nesta etapa apenas o escopo do projeto. Definiu-se o sistema do produto bem como sua fronteira e unidade funcional, o *software* utilizado para ACV, a base de dados e o processo de referência utilizados e o método de AICV e suas categorias de impacto.

3.2.1 Visita à empresa

Para que se realizasse a ACV da produção de *pellets* de madeira, foi necessário que se conhecesse o processo de produtivo do mesmo. Para tanto, foi realizada uma visita a empresa *Timber Creek Farms*, localizada na cidade de Piên, no estado do Paraná, no dia 13 de novembro de 2013. A fábrica foi importada do Canadá, está em atividade desde o ano de 2012, possui

capacidade instalada de 90.000 t/ano e é referência na produção de *pellets* de madeira no país (O REGIONAL, 2012). Na visita foi possível detalhar o fluxograma de produção do material e levantar dados inerentes ao desenvolvimento do estudo de AVC.

3.2.2 Sistema de produto, fronteira do sistema e unidade funcional

A Figura 7 ilustra esquematicamente o sistema de produto para o ciclo de vida da produção de *pellets*, cujas unidades de processo são: floresta (1); transporte (2); picador (3); moagem (4); secador (5) e pelletização (6).

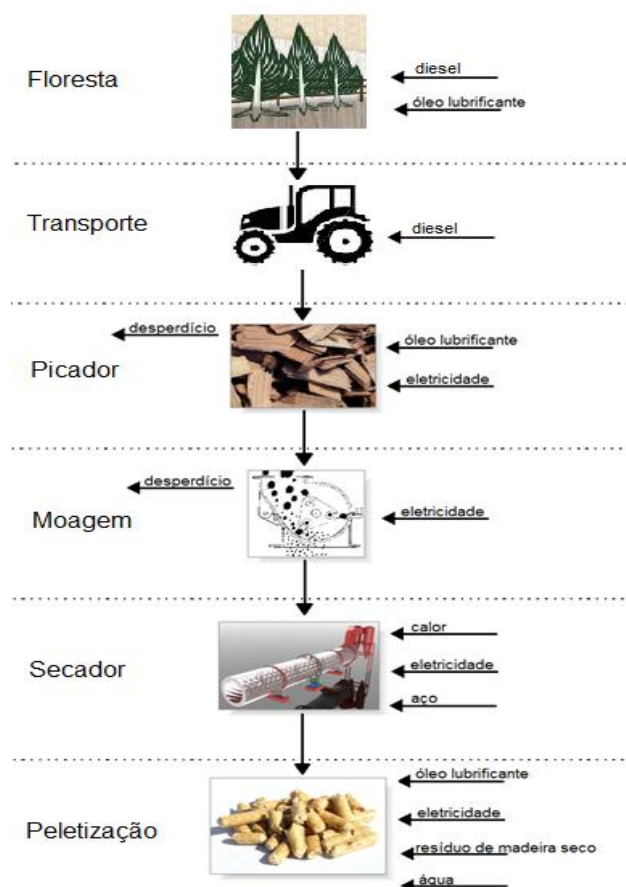


FIGURA 7 – SISTEMA DE PRODUTO DEFINIDO PARA A PRODUÇÃO DE *PELLETS* DE MADEIRA.

FONTE: A AUTORA com base em GREENDELTA, 2013

Já a fronteira adotada para o sistema apresentado na figura 6 foi a *cradle to gate*, que consiste em uma técnica simplificada de ACV e considera os estágios de produção da matéria prima até a fabricação do produto estudado dentro da empresa.

A unidade funcional fornece uma relação para os fluxos de entrada e saída. Neste estudo a unidade funcional é equivalente ao fluxo de referência ,ou seja a produção de 1 kg de *pellets* de madeira Classe A1.

3.2.3 Software de apoio à ACV

Para a simulação da avaliação do ciclo de vida foi utilizado o *software* livre openLCA versão 1.3.3, desenvolvido pela empresa GreenDelta, uma consultora independente de sustentabilidade e desenvolvedora de *softwares*, fundada em 2004 e localizada em Berlin, Alemanha.

A primeira versão da ferramenta foi lançada em 2008 (openLCA 1.0) e permite aos usuários o desenvolvimento de modelagens profissionais de ciclo de vida, incluindo a aplicação de alocações, expansões dos sistemas e incertezas de cálculo. Em resumo o programa possui como princípio modelar avaliações e ciclos de vida de maneira rápida, confiável, de projetos simples até os mais sofisticados, usando uma linguagem padrão de programação – Java (GREENDELTA, 2013).

3.2.4 Banco de dados: BioEnergieDat

Para esta pesquisa foi utilizado o banco de dados BioEnergieDat, desenvolvido pelo Instituto de Avaliação de Tecnologia e Análise de Sistemas (ITAS - *Institute for Technology Assessment and Systems Analysis*) do Instituto de Tecnologia Karlsruher (KIT – *Karlsruher Institute of Technology*), localizado na Alemanha. Este banco de dados fornece uma base de informações para o uso energético da biomassa e inclui referências sobre o estado da arte, os

efeitos ecológicos bem como características econômicas dos processos de produção, de abastecimento e de conversão. A descrição dos processos contidos nesta base de dados é baseada no cenário alemão de consumo e distribuição, o mesmo ocorre com a origem e utilização de matéria-prima, normas aplicáveis e uso de energia de eletricidade (KIT, 2013).

3.2.5 Processo de referência

Como processo de referência para a avaliação do ciclo de vida de produção de *pellets* de madeira foi utilizado o processo pré-existente no banco de dados “*Pelletierung Industrierestholz, A1 Holzpellets (9% Wassergehalt), ab Pelletierung (DE)*” traduzido como “Pelletização de resíduos de madeira industrial, *pellets* de madeira ‘A1’ (teor de umidade 9%) (DE)”. Este processo foi selecionado por possuir maior semelhança ao processo encontrado na visita realizada à empresa e alguns de seus parâmetros foram modificados para que se adequassem à realidade do local. O sistema é descrito como transformação de resíduos industriais de madeira, serragem e maravalha, secos e úmidos, em *pellets* de madeira A1, em conformidade com a norma DIN EN 14961-2 (2010) (Bicombustíveis sólidos – Classes e especificações dos combustíveis – *Pellets* de madeira para uso não industrial). Inclui o processo de moagem, condicionamento, pelletização, e não considera os gastos de demanda de concreto, aço, terraplanagem, etc existentes na instalação do projeto da fábrica.

Os fluxos de entrada e saída do processo (*inputs* e *outputs*) estão listados no Quadro 5:

Inputs				
Fluxo	Categoria	Propriedade do Fluxo	Unidade	Quantidade Resultante
Eletricidade, Produção Mista (ALE)	Eletricidade/ produção mista	Energia	MJ	Demanda atual
Resíduos de madeira Industrial, serragem/maravalha (teor de água de 8%), a partir de serraria	BioEnergieDat/ Desenvolvimento da Biomassa	Massa	kg	Demanda de aparas de madeira
Madeira industrial, pré-triturados secos + (w = 10%), Pelletização livre	BioEnergieDat/ Desenvolvimento da Biomassa	Massa	kg	Demanda de RMI (Resíduo de Madeira Industrial)
Amido de Milho, aditivo, no local	Produção Agrícola	Massa	kg	Demanda de aditivo
Óleo Lubrificante	BioEnergieDat/ Fluxo Auxiliar	Massa	kg	Demanda de óleo
Água de torneira	Fornecimento de água/ Produção	Massa	kg	Adição de água
Outputs				
<i>Pellets</i> de madeira A1 (teor de água de 9%), a partir de pelletização	BioEnergieDat/ Desenvolvimento da Biomassa	Massa	kg	1.0
Vapor d'água	Ar/inespecífico	Massa	kg	Água evaporada

QUADRO 5 – FLUXOS DE ENTRADA E SAÍDA DO PROCESSO DE REFERÊNCIA.
 FONTE: A AUTORA com base em GREENDELTA, 2013

Os parâmetros utilizados para a modelagem do processo estão listados na Tabela 1, abaixo:

TABELA 1 - PARÂMETROS UTILIZADOS PELO PROCESSO DE REFERÊNCIA UTILIZADO.

Nome da variável	Fórmula	Valor Numérico	Descrição
Capacidade da Planta ³	50000	50000	[t_Pellet/a] capacidade típica de planta
Teor de carbono no RMI	0,49	0,49	[kg_C/kg massa de madeira seca] Teor de carbono das aparas de madeira e do RMI
Teor de carbono nos pellets ⁴	(1-teor de aditivo)*teor de carbono no RMI +teor de aditivo*teor de carbono no aditivo	0,48954	[Kg_C / kg_Pellet seco] Teor de carbono nos pellets
Teor de carbono no aditivo ⁵	72/162	0,4444	[kg_C/kg_Aditivo] Teor de carbono no aditivo (amido)
Teor de RMI	1-teor de aparas de madeira	0,24	[kg_RMI seco/kg_massa de madeira seca] Participação (m-% seca) da madeira seca pré-picada+resíduos industriais na pelletização de madeira
Teor de aparas de madeira	0,76	0,76	[kg_ aparas de madeira seca/kg_Massa de madeira seca] Demanda (m-% de matéria seca) de serragem e aparas de madeira na pelletização de madeira [0-1
Teor de aditivo ⁵	0,01	0,01	[kg_amido de miho seco/kg_Pellets de madeira seca] Proporção (m-% seca). Amido prensado no pellet final [0-2 m-% seco].
Horas de Operação ₃	7500	7500	[h/a] Horas de operação por ano [0;8760],
Demanda de óleo lubrificante	Demanda de óleo lubrificante específica/rendimento	1,50E-05	[kg_óleo lubrificante/kg_Pellet] Demanda de óleolubrificante paraa produção de 1 kg de pellets de madeira

Continua

³ Parâmetros adaptados para os exercidos na empresa.⁴ Parâmetros modificados pela retirada dos parâmetros identificados com o sobrescrito "5".⁵ Parâmetro retirado do modelo para aproximação da realidade da empresa.

Continuação Tabela 1

Nome da variável	Fórmula	Valor Numérico	Descrição
Demanda de óleo lubrificante específica	0,1	0,1	[kg_óleo lubrificante/h] Demanda de óleo lubrificante por hora [80-100g/h],
Demanda de madeira ⁴	(1-teor de umidade dos <i>pellets</i>)*(1-teor de aditivo)	0,9009	[kg_massa de madeira seca/kg_Pellet] Quantidade de madeira seca (RMI+aparas de madeira) para 1 kg de <i>pellets</i> de madeira
Demanda de RMI	Teor de RMI*Demanda de madeira/(1-Teor de umidade RMI)	0,24024	[kg_RMI/kg_Pellet] Quantidade de resíduo de madeira industrial para a produção de 1 kg <i>pellets</i> de madeira (m-% umidade)
Demanda de aparas de madeira	Teor de aparas de madeira*Demanda de madeira/(1-Teor de umidade aparas de madeira)	0,74422174	[kg_aparas de madeira/kg_Pellet] Quantidade de serragem e aparas de madeira para 1 kg <i>pellets</i> de madeira (m-% umidade)
Demanda de aditivo ⁵	(1-teor de umidade dos <i>pellets</i>)*teor de aditivo/(1-Teor de umidade aditivo)	0,0105814	[kg_aditivo/kg_Pellet] Quantidade de aditivo por kg de pellet (m-% umidade)
Demanda atual	Demanda atual específica*Fator kgt*Fator kWh MJ	0,414	[MJ_el/kg_Pellet] Demanda de energia elétrica para a produção de 1 kg <i>pellets</i> de madeira
Demanda atual específica	115	115	[kWh_el/t_Pellet] Demanda de energia elétrica para a produção <i>pellets</i> de madeira [115-150 kWh/t_Pellet],
Rendimento	Capacidade da Planta /Fator kgt/Utilização	6,6667E+14	[kg_Pellet/h] Volume de Produção por hora
Fator kgt	0,001	0,001	[kg/t] Fator de conversão kg -> t (constante)
Fator kWh MJ	3,6	3,6	[MJ/kWh] Fator de conversão kWh -> MJ (constante)
Poder calorífico RMI	(Poder calorífico RMI úmido+2,44*Teor de umidade RMI)/(1-Teor de umidade RMI)	1,8538E+14	[MJ/kg_RMI seco] Poder calorífico do RMI seco

Continua

Continuação Tabela 1

Nome da variável	Fórmula	Valor Numérico	Descrição
Poder calorífico RMI úmido	16,44	16,44	[MJ/kg_RMI] Poder calorífico do RMI úmido.
Poder calorífico <i>pellets</i> ⁴	teor de aditivo*Poder calorífico aditivo+(1-teor de aditivo)*(Teor de aparas de madeira*Poder calorífico aparas de madeira+Teor de RMI*Poder calorífico RMI)	1,8512E+14	[MJ/kg_Pellet seco] Poder calorífico do pellet seco
Poder calorífico <i>pellets</i> úmidos ⁴	Poder calorífico <i>pellets</i> *(1-teor de umidade dos <i>pellets</i>)-2,44*teor de umidade dos <i>pellets</i>	1,6626E+14	[MJ/kg_Pellet] Poder calorífico do pellet úmido
Poder calorífico aparas de madeira	(Poder calorífico aparas de madeira úmidas+2,44*Teor de umidade aparas de madeira)/(1-Teor de umidade aparas de madeira)	1,8538E+14	[MJ/kg_aparas de madeira secas] Poder calorífico das aparas de madeira secas
Poder calorífico aparas de madeira úmidas	16,86	16,86	[MJ/kg_aparas de madeira] Poder calorífico aparas de madeira úmidas
Poder calorífico aditivo ⁵	(Poder calorífico aditivo úmido+2,44*Teor de umidade aditivo)/(1-Teor de umidade aditivo)	1,592E+14	[MJ/kg_aditivo seco] Poder calorífico do aditivo seco.
Poder calorífico aditivo úmido ⁵	13,35	13,35	[MJ/kg_aditivo] Poder calorífico do aditivo úmido.
Massa de entrada sem adição de água ⁴	Demanda de aditivo+Demanda de aparas de madeira+Demanda de RMI	0,99504313	[kg_ein/kg_Pellet] Entrada total sem adição de água
Massa de água presente no material de entrada ⁴	Demanda de RMI*Teor de umidade RMI+Demanda de aparas de madeira*Teor de umidade aparas de madeira+Demanda de aditivo*Teor de umidade aditivo	0,08504313	[kg_Água/kg_Pellet] Água presente nos materiais de entrada para 1 kg de <i>pellets</i>

Continua

Continuação Tabela 1

Nome da variável	Fórmula	Valor Numérico	Descrição
Teor de umidade original	Massa de água presente no material de entrada/Massa de entrada sem adição de água	0,08546678	[kg_Água/kg_Pellet] IST-Teor de umidade, sem adição de água
Teor de umidade Desejado	0,11	0,11	[kg_Água/kg_Massa de madeira] Ponto de ajuste -Teor de umidade na peletizadora [10 - 15 m-%]
Teor de umidade RMI	0,1	0,1	[kg_Água/kg_RMI] Teor de água da madeira pré-picado + RMI
Teor de umidade dos <i>pellets</i>	Teor de umidade Desejado-0,02	0,09	[kg_Água/kg_Pellet] Teor de umidade dos <i>pellets</i> de madeira, definido para a classe A1 M10<10m-% umidade
Teor de umidade após adição d'água	(Adição de água+Massa de água presente no material de entrada)/(Adição de água+Massa de entrada sem adição de água)	0,11	[kg_Água/kg_Pellet] Teor de umidade após qualquer adição de água
Teor de umidade aparas de madeira	0,08	0,08	[kg_Água/kg_aparas de madeira] Teor de umidade nas aparas de madeira
Teor de umidade aditivo ⁵	0,14	0,14	[kg_Água/kg_Amido de milho] Teor de umidade do amido de milho, suposição própria
Vapor d'água	(Massa de entrada sem adição de água+Adição de água)*(teor de umidade após adição d'água-teor de umidade dos <i>pellets</i>)/(1-teor de umidade dos <i>pellets</i>)	0,02247191	[kg_Água/kg_Pellet] Água evaporada durante a pelletização.
Adição de água	if(Teor de umidade original<="">	0,02742878	[kg_Água/kg_Pellet] Água, quando o teor de umidade é inferior ao valor nominal para se atingir o valor desejado

Conclusão

FONTE: A AUTORA com base em GREENDELTA, 2013.

Alguns fatores, como citado anteriormente, foram alterados para adaptação do modelo. A primeira mudança a ser realizada, foi a retirada do *input* “Amido de Milho, aditivo, no local” do processo, pois a empresa não emprega nenhum tipo de aditivo na produção de seus *pellets*. Pelo mesmo motivo, todos os parâmetros que relacionavam o uso de aditivo na Tabela 1 foram retirados ou modificados, no caso da fórmula correspondente a ele fazer menção aos parâmetros excluídos. Por fim, os parâmetros “Capacidade da Planta” e “Horas de Operação” foram alterados. No processo de referência os valores numéricos correspondentes a esses itens eram 50.000 toneladas de *pellets*/ano e 7.500 horas de operação/ano, respectivamente. Todavia, por mais que a capacidade de produção da empresa seja maior, atualmente se produz um total de 500 toneladas/mês, equivalente a 6.000 toneladas de *pellets*/ano, e a operação é de 8 h/dia, 5 dias/semana. Considerando um total de 22 dias úteis/mês as horas de operação da empresa são 2.112 horas de operação/ano, sendo estes valores (6.000 t/ano; 2.112 h/ano) os utilizados na modelagem.

3.2.6 Métodos de AICV

Para a avaliação de impacto do ciclo de vida foram selecionados as duas famílias de métodos mais utilizadas em ACV, segundo Takeda (2009), Eco-indicator e CML, sendo que as versões selecionadas foram a Eco-indicator 99 e o CML 2001. Os métodos selecionados possuem abordagem distintas, enquanto o CML 2001 é orientado ao problema (*midpoint*) o Eco-indicator 99 é orientado ao dano (*endpoint*).

O método CML conta com fatores de caracterização específicos já quantificados para cada categoria de impacto, dessa forma as emissões discriminadas na ICV são convertidas em potencial de impacto ambiental pelo produto entre a quantidade e seu fator de caracterização correspondente, porém, não existe a possibilidade de ponderação e agregação destes resultados em um mesmo sistema de pontuação. Este método por apresentar uma grande amplitude de impactos possui grande representatividade na comunidade científica (PIEKARSKI *et al*, 2012), entre as principais categorias

presentes no CML 2001 citam-se: acidificação, depleção da camada de ozônio, depleção dos recursos abióticos, ecotoxicidade, eutrofização, mudança climática e toxicidade humana.

Quando se faz a AICV por meio do Eco-indicator 99 modela-se a cadeia de causa-efeito do ciclo de vida do produto até seus pontos finais (danos). As categorias de impacto neste método estão agrupadas em três tipos de dano: à saúde humana, à qualidade do ecossistema e aos recursos. O procedimento geral para o cálculo do Eco-indicator está ilustrado na Figura 8:

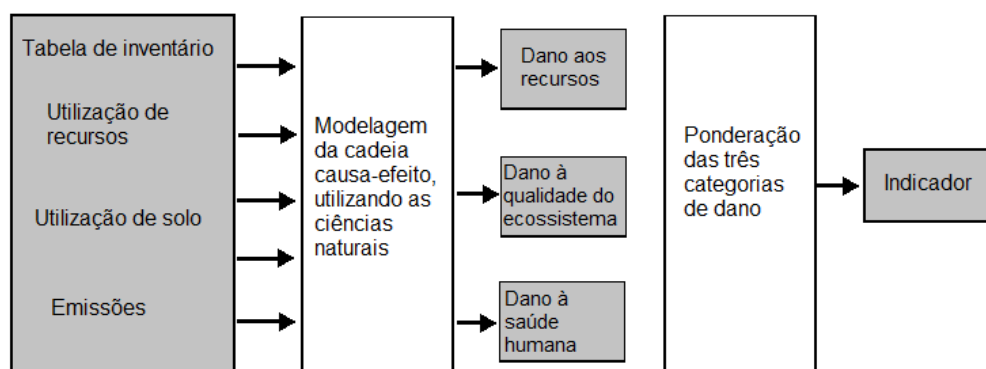


FIGURA 8 – PROCEDIMENTO GERAL DE CÁLCULO DO ECO-INDICATOR 99. AS CAIXAS EM BRANCO REFEREM-SE A PROCEDIMENTOS E AS CAIXAS HACHURADAS REFEREM-SE A RESULTADOS INTERMEDIÁRIOS.

FONTE: A AUTORA com base em GOEDKOOOP e SPRIENSMA, 2001.

O método divide a avaliação em três abordagens (GOEDKOOOP, SPRIENSMA, 2001):

- 1) Igualitária (E): que fornece uma perspectiva em longo prazo, sendo qualquer comprovação científica suficiente para contemplar um modelo de caracterização.
- 2) Individualista (I): fornece uma perspectiva em curto prazo, apenas efeitos provados sustentam a inserção de modelos de caracterização.
- 3) Hierárquica (H): a inclusão é feita pelo consenso entre especialistas. Esta abordagem é a sugerida como padrão pelos seus autores.

O Eco-indicator possui as etapas opcionais de AICV (normalização, ponderação e agregação, sua ponderação visa refletir a visão da sociedade quanto aos danos e potenciais impactos e o resultado obtido é expresso em um

sistema pontuação único (TAKEDA, 2008). Cada ponto pode ser interpretado com um milésimo da carga ambiental anual de um habitante europeu médio.

As categorias de impacto presentes nos dois métodos estão listadas no Quadro 6:

Categoria de impacto	CML 2001	Eco-indicator 99
Depleção abiótica	kg Sb eq	
Mudança Climática	kg CO ₂ eq	DALY ⁶
Depleção da camada de ozônio	kg CFC-11 eq	DALY
Toxicidade humana	kg 1,4-DB eq	
Ecotoxicidade	kg 1,4-DB eq	PDF* m ² yr ⁷
Acidificação	kg SO ₂ eq	PDF* m ² yr
Eutrofização	kg PO ₄ eq	PDF* m ² yr
Carcinogênicos		DALY
Smog de verão	kg C ₂ H ₂ eq	
Recursos energéticos		MJ excedente ⁸
Respiratórios (orgânicos/inorgânicos)		DALY
Radiação		DALY
Uso da terra		PDF* m ² yr

QUADRO 6 – CATEGORIAS DE IMPACTO PRESENTES NOS MÉTODOS DE AICV CML 2001 E ECO-INDICATOR 99.

FONTE: Adaptado de TAKEDA (2009) e GREENDELTA 2013.

⁶ Disability Adjusted Life Years (Anos de Vida Ajustados à Deficiência) número de anos de vida perdidos e número de anos vividos com deficiência de saúde.

⁷ Potentially Disappeared Fraction, perda de espécies em certa área, durante certo tempo.

⁸ Excedente energético necessário para futuras extrações de minerais e combustíveis fósseis.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir serão descritos os resultados obtidos para a ACV da produção de *pellets* e madeira.

4.1 INVENTÁRIO DE CICLO DE VIDA (ICV) DE *PELLETS* DE MADEIRA – FASE 2

Após a análise dos bancos de dados disponíveis no *software* openLCA, bem como seus processos, selecionou-se aquele que mais se adequava a proposta do trabalho e foi realizada a adaptação de alguns parâmetros, conforme a metodologia descrita no Capítulo 3. Com estes dados, foi feita a elaboração do ICV dos *pellets* de madeira. No inventário gerado, foram identificados e analisados os *inputs*, ou seja, os recursos consumidos durante o ciclo de vida do processo, e os *outputs*, que são as descargas ambientais do processo.

A Tabela 2 apresenta todos os fluxos de entrada e saída (*inputs* e *outputs*) relacionados à produção de *pellets* de madeira e a cadeia de suprimentos conectada a este processo, respeitando os limites de fronteira e sistema definidos no escopo do estudo e lembrando que o resultado foi gerado em função da unidade funcional do processo (produção de 1 kg de *pellets* de madeira).

Para que fosse mais fácil identificar a quantidade de emissões lançadas ao ecossistema em um ano de produção de *pellets* na empresa os valores obtidos nos fluxos de saída foram extrapolados, ao invés de se considerar a produção de 1 kg foi considerada a produção de 6000 t (valor atual da empresa) (Tabela 2).

TABELA 2 – INVENTÁRIO DO CICLO DE VIDA DO PROCESSO PRODUTIVO DE *PELLETS* DE MADEIRA.

Inputs				
Fluxo	Categoria	Sub-categoria	Un.	Resultado
CO ₂ , no ar	Recurso	No ar	kg	0,394376
Concreto, na planta	Materiais construtivos	Concreto	m ³	3,24E-08
Diesel, armazenamento regional	Óleo	Combustíveis	kg	0,000328
Eletricidade, produção mista DE	Eletricidade	Produção mista	MJ	0,46904
Resíduos de madeira Industrial, serragem / maravalha (teor de umidade de 8%), a partir de serraria	BioEnergieDat	Abastecimento de biomassa	kg	0,751739
Carbono, biogênico	BioEnergieDat	Fluxo auxiliar	kg	3,12E-17
Óleo lubrificante, na planta	Químicos	Orgânicos	kg	3,95E-05
Ocupação, floresta	Recurso	Terra	m ² *a	0,336021
Polietileno, HDPE, granulado, na planta	Plásticos	Polímeros	kg	2,88E-07
Cloreto de potássio, como K ₂ O, armazenamento regional	Meios de produção agrícola	Fertilizante mineral	kg	2,22E-05
Fabricação de produtos de aço, metalurgia média	Metais	Fabricação em geral	kg	2,87E-05
Água de torneira, no local	Suprimento de água	Produção mista	kg	0,028066
Trator, produção	Meios de produção agrícola	Maquinário	kg	6,91E-06
Transporte, caminhão >32t, EURO3	Sistemas de transporte	Estrada	t*km	0,000864
Fosfato monocálcio, como P ₂ O ₅ , armazenamento regional	Meios de produção agrícola	Fertilizante mineral	kg	9,04E-06
Outputs				
Fluxo	Categoria	Sub-categoria	Un.	Resultado
Desperdício, resíduos de madeira Industrial, serragem / maravalha (teor de água de 8%), a partir de serraria	BioEnergieDat	Fluxo de resíduos	kg	0,003394
Desperdício, pedaços de madeira de resíduos industriais (35% de umidade)	BioEnergieDat	Fluxo de resíduos	kg	0,003394
continua				

continuação Tabela 2

Outputs				
Fluxo	Categoria	Sub-categoria	Un.	Resultado
CO ₂ , fossil	Ar	Não especificado	kg	0,001022
N ₂ O	Ar	Não especificado	kg	4,64E-07
Poeira, Não especificado	Ar	Não especificado	kg	4,15E-06
HCl	Ar	Não especificado	kg	1,46E-06
Metano, fossil	Ar	Não especificado	kg	4,22E-08
NO ₂	Ar	Não especificado	kg	3,93E-08
NO _x	Ar	Não especificado	kg	3,97E-05
COV-NM, compostos orgânicos voláteis não metanos, Não especificado na origem	Ar	Não especificado	kg	5,15E-06
HPA, hidrocarbonetos policíclicos aromáticos	Ar	Não especificado	kg	0,000219
S ₂ O	Ar	Não especificado	kg	3,31E-07
SO _x	Ar	Não especificado	kg	1,55E-05
Vapor d'água	Ar	Não especificado	kg	0,115805

FONTE: A AUTORA com base em GREENDELTA, 2013.

TABELA 3 – FLUXOS DE SAÍDA REFERENTES À PRODUÇÃO DE 6000 T DE *PELLETS* DE MADEIRA.

Fluxo	Unidade	Resultado
CO ₂ , fóssil	kg	6132,67
N ₂ O	kg	2,78275
Poeira, Não especificado	kg	24,8842
HCl	kg	8,75703
Metano, fóssil	kg	0,2533
NO ₂	kg	0,23551
NO _x	kg	238,332
COV-NM, compostos orgânicos voláteis não metanos, Não especificado na origem	kg	30,9194
HPA, hidrocarbonetos policíclicos aromáticos	kg	1312,37
S ₂ O	kg	1,98525
SO _x	kg	92,9311
Vapor d'água	kg	694831

FONTE: A AUTORA com base em GREENDELTA, 2013.

Avaliando os dados que em um primeiro momento não parecem ser significativos, estando por vezes na casa de micro-quilos para 1 kg de *pellets*, para 6000 t de produto (Tabela 3), nota-se que as emissões podem chegar a valores próximos à 6 t de CO₂/ano e 1 t de HPAs (Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos).

4.2 AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS DO CICLO DE VIDA (AICV) – FASE 3

A AICV da produção de *pellets* de madeira, foi realizada por dois métodos diferentes, o Eco-indicator 99 e o CML 2001 previamente descritos. Neste item, cada parâmetro de *output* do ICV é associado a uma ou mais categorias de impacto dos modelos. Nas tabelas 4 e 5 encontram-se as categorias de impacto e seu resultado para o Eco-indicator 99 e para o CML 2001, respectivamente, elaboradas para a produção de uma unidade funcional do sistema.

TABELA 4 – VALORAÇÃO DAS CATEGORIAS DE IMPACTO AMBIENTAL DA PRODUÇÃO DE *PELLETS* DE MADEIRA PARA O MÉTODO ECO-INDICATOR 99.

Categoria de Impacto - Eco-indicator 99		Unidade de Referência	Resultado
Dano à qualidade do ecossistema	Acidificação e eutrofização	Pontos	1,77E-05
	Ecotoxicidade	Pontos	1,33E-08
	Uso do solo	Pontos	0,002882
Dano à saúde humana	Carcinogênicos	Pontos	0,000966
	Mudança climática – aquecimento global	Pontos	6,41E-06
	Radiação ionizante	Pontos	0
	Depleção da camada de ozônio	Pontos	0
	Efeitos respiratórios	Pontos	0,000104
Dano aos recursos	Combustíveis fósseis	Pontos	0
	Extração mineral	Pontos	0
Total		Pontos	0,003976

FONTE: A AUTORA com base em GREENDELTA, 2013.

TABELA 5 - VALORAÇÃO DAS CATEGORIAS DE IMPACTO AMBIENTAL DA PRODUÇÃO DE *PELLETS* DE MADEIRA PARA O MÉTODO CML 2001

Categoria de Impacto - CML 2001	Unidade de Referência	Resultado
Acidificação	kg SO ₂ -Eq	2,94206E-05
Eutrofização	kg PO ₄ -Eq	5,28908E-06
Ecotoxicidade - Água doce (100 anos)	kg 1,4-DCB-Eq	0,037321548
Ecotoxicidade - Marinha (100 anos)	kg 1,4-DCB-Eq	0,933968287
Ecotoxicidade - Terrestre (100 anos)	kg 1,4-DCB-Eq	0,000222949
Uso do solo - Competição	m ² a	0,336021268
Mudanças Climáticas - Aquecimento global 100 anos	kg CO ₂ -Eq	0,001161377
Toxicidade humana (100 anos)	kg 1,4-DCB-Eq	125,2152299
Depleção da camada de ozônio (20 anos)	kg CFC-11-Eq	0
Depleção dos recursos abióticos	kg antimony-Eq	0
Oxidação fotoquímica (smog de verão)	kg ethylene-Eq	1,61353E-08

FONTE: A AUTORA com base em GREENDELTA, 2013.

A partir da avaliação qualitativa da AICV, observa-se que para o Eco-indicator 99 existe uma maior influência das seguintes categorias: (i) Uso do solo (dano à qualidade do ecossistema); (ii) Carcinogênicos e (iii) Efeitos respiratórios (ambos pertencentes a categoria dano à saúde humana).

Dentre as categorias, observou-se que o “Uso do solo” é influenciado unicamente pelo fluxo “Ocupação, floresta”; os carcinogênicos pela emissão de HPAs e os efeitos respiratórios pelos gases metano, NOx, COVs (Compostos Orgânicos Voláteis), HPAs e SO₂.

Para o CML 2001, as três categorias mais influentes são: (i) Toxicidade humana; (ii) Ecotoxicidade (Marinha) e (iii) Uso do solo (iii). A categoria de toxicidade humana é influenciada pelo HCl, pelo NOx, pelos HPAs e pelo S₂O. Já a ecotoxicidade marinha tem influência direta dos HPAs, e o uso do solo pelo mesmo motivo encontrado para a categoria equivalente do Eco-indicator 99. Estes fluxos foram apenas identificados na AICV realizada, todavia para este trabalho não foram feitas pesquisas detalhadas sobre seu impacto sobre o meio ambiente.

A categoria “mudanças climáticas – aquecimento global”, presente nos dois métodos avaliados, obteve influência dos fluxos dos mesmos gases, CO₂ fóssil, N₂O e metano.

Os processos que possuem maior contribuição nas categorias supracitadas, na AICV realizada pelo método Eco-indicator 99 e CML 2001, estão ilustrados abaixo (Figura 9, Figura 10).

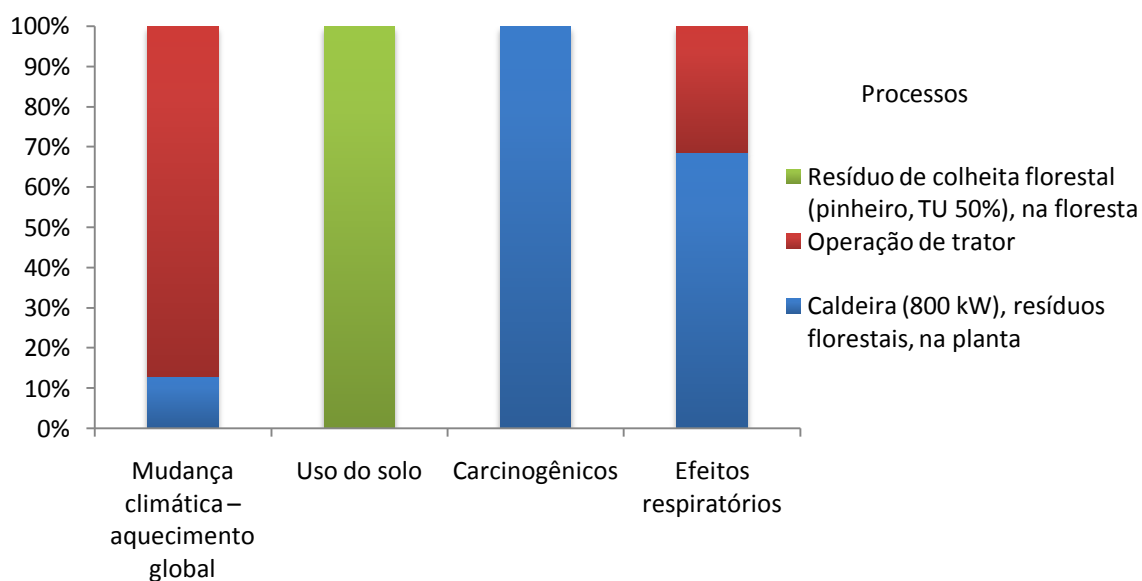


FIGURA 9 – CONTRIBUIÇÃO DOS PROCESSOS DA CADEIA DE SUPRIMENTOS DA PRODUÇÃO DE *PELLETS* DE MADEIRA NAS PRINCIPAIS CATEGORIAS DE IMPACTO AVALIADAS, MÉTODO ECO-INDICATOR 99.

FONTE: A AUTORA com base em GREENDELTA, 2013

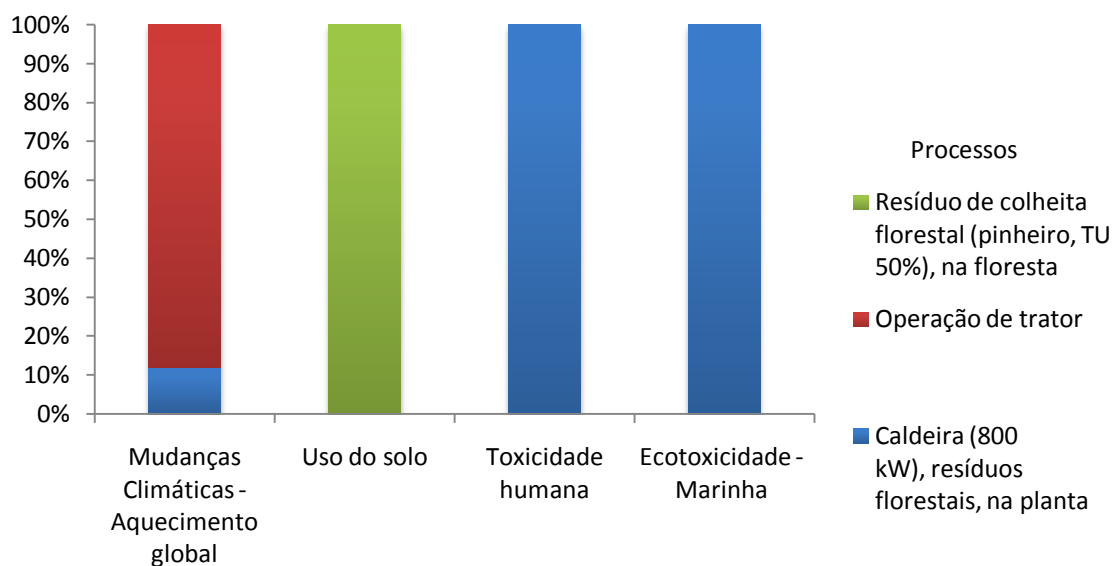


FIGURA 10 - CONTRIBUIÇÃO DOS PROCESSOS DA CADEIA DE SUPRIMENTOS DA PRODUÇÃO DE *PELLETS* DE MADEIRA NAS PRINCIPAIS CATEGORIAS DE IMPACTO AVALIADAS, METODO CML 2001.

FONTE: A AUTORA com base em GREENDELTA, 2013

Apesar das diferenças entre os métodos de AICV, os mesmos processos - “Resíduo de colheita florestal (pinheiro TU 50%), na floresta” que se refere à colheita mecanizada de resíduos florestais, “Caldeira (800 kW), resíduos florestais, na planta” e “Operação de trator” - possuíram maior contribuição para as categorias de impacto com maior representatividade nas duas abordagens. Sendo que, em termos de porcentagem, as categorias “Uso do solo” e “Mudanças climáticas – Aquecimento global” apresentaram resultados semelhantes. Comparações entre os dois métodos, não estando em proporções, como a porcentagem, não são possíveis, pois os métodos estudados apresentam unidades de referência distintas.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Segundo a avaliação realizada, utilizando a ferramenta OpenLCA, e os métodos de AICV Eco-indicator 99 e CML 2001, um dos maiores impactos causados com a produção de *pellets* de madeira está no uso do solo, como espera-se de um processo baseado na cadeia florestal.

O processo que contribuiu majoritariamente para as categorias de impactos mais relevantes foi o de geração de calor pela caldeira, responsável pela secagem dos resíduos de madeira que chegam com teor de umidade acima do desejado. Este processo contribui para as categorias: Mudança climática – Aquecimento global (para os dois métodos), Danos à saúde humana (carcinogênicos e efeitos respiratórios) – Eco-indicator 99, Toxicidade humana e Ecotoxicidade (Marinha) CML 2001.

Apesar dos resultados apresentados demonstrarem que a ACV é uma ferramenta útil no auxílio do monitoramento de sistemas de produção, a falta de uma base de dados aplicada à realidade brasileira se torna uma grande limitação da aplicabilidade desta ferramenta. Bem como, métodos de AICV que também sejam moldados às características encontradas no país. Assim, torna-se necessária a utilização e adaptação de modelos e métodos aplicados à realidade de países estrangeiros.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT. **NBR ISO 14040**: Gestão Ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípios e Estrutura. Rio de Janeiro, 2009.

BRITO, J. O. **O uso energético da madeira**. Estud. av., São Paulo v. 21 n. 59, Abril de 2007.

CARVALHO, P. G. **Aplicação do Programa SimaPro na Avaliação do Impacto Ambiental causado na Produção e Exploração Offshore de Petróleo**. 76 f. Monografia (Graduação em Engenharia Química), UFRJ, Rio de Janeiro, 2008.

EPA. **Life Cycle Assessment: Principles and Practice**. Cincinnati, 2006.

FERREIRA, J. V. **Análise De Ciclo De Vida**. Instituto Politécnico de Viseu, Viseu, 2004.

GARCIA, D. P. **Caracterização química, física e térmica de pellets**. 101 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). FEG/UNESP. Guaratinguetá, 2010.

GOEDKOP, M., SPRIENSMA, R. **The Eco-indicator 99: Methodology Report. A damage oriented method for Life Cycle Impact Assessment**. Netherlands, 2001.

GONÇALVES, M. M. **Análise ambiental e energética da produção de Eucalyptus globulus para conversão em energia eléctrica**. 71 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Ambiente), Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2010.

GREENDELTA. openLCA 1.3.3 software, 2013.

GREENDELTA. **The openLCA project**. 2013. Acesso em 14 de Dezembro de 2013, disponível em OPENLCA: <http://www.openlca.org/openlca>

JENKINS, D. **Wood Pellet Heating Systems: The Earthscan Expert Handbook for Planning, Design and Installation**. Londres, 2010.

KEIL, M. M. **Avaliação do ciclo de vida (acv) do mobiliário de madeira e derivados de madeira produzido na região do planalto norte catarinense.** 132 f. Dissertação (Mestrado em Design), Universidade Federal Do Paraná Curitiba, 2012.

KIT. (2013). **BioEnergieDat** - *Providing an up-to-date harmonized data base aiming at the advancement of a sustainable bioenergy strategy.* Acesso em 09 de Dezembro de 2013, disponível em Institute for Technology Assessment and Systems Analysis (ITAS): http://www.its.kit.edu/english/projects_sche10_bioenergie-dat.php

LIFE CYCLE INITIATIVE. **Summary list of the LCIA methods.** 2011. *apud* SILVA, D. A. L. **Avaliação do Ciclo de Vida da Produção do Paineiro de Madeira MDP no Brasil.** 207 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

LIMA, A. M. **Avaliação do ciclo de vida no Brasil – inserção e perspectivas.** 116 p. Dissertação (Mestrado em Gerenciamento e Tecnologias Ambientais no Processo Produtivo), Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2007.

MAGELLI, F., BOUCHER, K., BI, H. T., MELIN, S., & BONOLI, A. **An environmental impact assessment of exported wood pellets from Canada to Europe.** *Biomass & Bioenergy*, 33, pp. 434-441, 2008.

MARIOTONI, C. A.; CUNHA, M. E. G.; BAPTISTELA, R. Z. **Uma discussão de diferentes softwares visando a aplicação da técnica Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) em indústrias.** In: Conferência Internacional sobre Avaliação de Ciclo de Vida - CILCA 2007, anais. São Paulo, 2007. 1 CD-ROM. *apud* RIBEIRO, P. H. **Contribuição ao Banco de Dados Brasileiro para Apoio à Avaliação do Ciclo de Vida: Fertilizantes Nitrogenados.** 341 p. Tese (Doutorado em Engenharia), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

NIGRI, E. M. **Análise comparativa do ciclo de vida de produtos alimentícios industriais e artesanais da culinária mineira**. 123 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção), UFMG, Belo Horizonte, 2012.

NOGUEIRA, L. A.; LORA, E. E. **Dendroenergia: Fundamentos e aplicações**. (2. ed. ed.). Rio de Janeiro: Interciência, 2003.

O REGIONAL. **Timber está pronta para iniciar produção**. Acessado em 13 de dezembro de 2013. Disponível em < <http://oregionalpr.com.br/2012/10/timber-esta-pronta-para-iniciar-producao>>, publicado em 11 de outubro de 2012.

OBERNBERGER, I.; THEK, G. **The Pellet Handbook**. London, 2010.

PA, A.; BI, X. T.; SOKHANSANJ, S. **Evaluation of wood pellet application for residential heating in British Columbia based on a streamlined life cycle analysis**. *Biomass & Bioenergy* , 49, p. 109-122, 2013.

PIEKARSKI, C. M.; LUZ, L. M.; ZOCHE, L.; FRANCISCO, A. C. **Métodos de avaliação de impactos do ciclo de vida: uma discussão para adoção de métodos nas especificidades brasileiras**. *Revista Gestão Industrial* , 08, p.222-240, 2012.

RASGA, R. O. **Pellets de madeira e sua viabilidade econômico-financeira na substituição do óleo**. 145 f. Dissertação (Mestrado em Agroenergia), Escola de Economia de São Paulo, São Paulo, 2013.

RIBEIRO, P. H. **Contribuição ao Banco de Dados Brasileiro para Apoio à Avaliação do Ciclo de Vida: Fertilizantes Nitrogenados**. 341 p. Tese (Doutorado em Engenharia), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

SALLES, A. C. **Emissões de gases do efeito estufa dos dormentes de ferrovia de madeira natural e de madeira plástica no brasil e na alemanha com base nos seus ciclos de vida**. 201 p. Tese (Doutorado em Planejamento Energético), COPPE/ UFRJ, Rio de Janeiro, 2009.

SILVA, D. A.; RIBEIRO, R. M.; SIMETTI, R.; SFEIR, T. A. **A indústria de pellet e perspectivas de mercado.** *Artigo Científico publicado em 2012.* <<http://malinovski.com.br/CongressoFlorestal/Trabalhos/05-Silvicultura/SILArtigo-37.pdf>> Acesso em 05 de dezembro de 2013.

SILVA, D. A. L. **Avaliação do Ciclo de Vida da Produção do Painel de Madeira MDP no Brasil.** 207 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

TAKEDA, A. **Levantamento de métodos de avaliação de impactos de ciclo de vida (AICV) e análise comparativa dos métodos mais utilizados.** 81 f. Monografia (Graduação em Engenharia Ambiental), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.