

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

LUIS ALFONSO ESQUIAQUI MARÍN

**IDENTIFICAÇÃO DO PERFIL AMBIENTAL POR MEIO DA AVALIAÇÃO DO
CICLO DE VIDA DA CIRCULARIDADE DOS FINOS DE CARVÃO VEGETAL NA
PRODUÇÃO DE BRIQUETES**

CURITIBA

2021

LUIS ALFONSO ESQUIAQUI MARÍN

IDENTIFICAÇÃO DO PERFIL AMBIENTAL POR MEIO DA AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DA CIRCULARIDADE DOS FINOS DE CARVÃO VEGETAL NA PRODUÇÃO DE BRIQUETES

Identification of the environmental profile through life cycle assessment of the circularity of charcoal fines in the production of briquettes

Dissertação apresentada como requisito para do título de mestre em nome do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador(a): Prof(a). Dr(a). Cássia Maria Lie Ugaya

Coorientador(a): Prof(a). Dr(a). Sueli de Fátima De Oliveira Miranda Santos

CURITIBA

2021



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

Esta licença permite download e compartilhamento do trabalho desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es), sem a possibilidade de alterá-lo ou utilizá-lo para fins comerciais. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.



LUIS ALFONSO ESQUIAQUI MARIN

**IDENTIFICAÇÃO DO PERFIL AMBIENTAL POR MEIO DA AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DA
CIRCULARIDADE DOS FINOS DE CARVÃO VEGETAL NA PRODUÇÃO DE BRIQUETES**

Trabalho de pesquisa de mestrado apresentado como requisito para obtenção do título de Mestre Em Ciência E Tecnologia Ambiental da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Área de concentração: Tecnologias E Processos Ambientais.

Data de aprovação: 10 de Dezembro de 2021

Prof.a Cassia Maria Lie Ugaya, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof.a Erika Pereira Felix, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof.a Sueli De Fatima De Oliveira Miranda Santos, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná (Utfpr)

Prof Thiago Oliveira Rodrigues, Doutorado - Ibict - Instituto Brasileiro de Informação em Ciência E Tecnologia

Documento gerado pelo Sistema Acadêmico da UTFPR a partir dos dados da Ata de Defesa em 10/12/2021.

AGRADECIMENTO

Primeiramente quero agradecer a Deus, por me dar a saúde e determinação para concluir o mestrado.

Aos meus amados pais, por me derem sempre o apoio e a força necessária para continuar e serem minha fonte inspiração. Em especial a meu pai Nelson, com quem aprendi que o amor de pai é eterno e incondicional. A meus irmãos pelo incentivo e apoio.

Aos meus orientadores, professora Dra. Cássia Ugaya e Dra. Sueli de Fátima De Oliveira Miranda Santos. Obrigado pela dedicação e aprendizado.

À prezada professora Dra. Erika Pereira, pela disposição para trabalhar nos laboratórios e pelo aprendizado na área de monitoramento do ar.

Aos meus colegas do mestrado pelo companheirismo. Especialmente, ao José Savioli, Jaylton Araújo e Gabriele Sturm, obrigado pela sua amizade e por todo o apoio.

A todos os meus amigos, que sempre estiveram comigo nessa caminhada, me dando conselhos e forças para seguir em frente. Adriana, Jonathan, Marvín, Mariana, Yelitza e Wagner um muito obrigado por terem me ajudado nesta jornada.

À Arlete Mello e Tirshá Tirapele, por toda a atenção e apoio recebido na minha moradia no Brasil.

Ao CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, pela concessão da bolsa de apoio à pesquisa – Código de financiamento: 440179/2019-0.

À Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) por fornecer os recursos necessários para o desenvolvimento deste projeto.

RESUMO

A produção de carvão vegetal no Brasil alcança anualmente em média cinco milhões de toneladas. Apesar de ser uma atividade economicamente viável, possui alguns passivos ambientais como poluição atmosférica (CO₂, NO_x, entre outros.) e geração de resíduo de finos de carvão vegetal decorrente do carregamento, transporte, armazenamento e peneiramento do material, dado que a friabilidade é uma das propriedades deste produto. O não aproveitamento desse resíduo ocasiona impacto ambiental, bem como perdas econômicas. Uma das formas de agregar valor a esse resíduo é pela transformação em briquetes, considerando que eles apresentam aproximadamente 60% do poder calorífico do carvão vegetal, portanto apropriados para uso como combustível em instalações industriais e usos domésticos. Diante do exposto, é importante identificar oportunidades de melhoria do desempenho ambiental advindas da produção de briquetes de finos de carvão vegetal de madeira de eucalipto, por meio da Avaliação do Ciclo de Vida. Para tanto, foram seguidas as recomendações constantes nas normas NBR 14040 e 14044. Foi elaborado o inventário a partir do levantamento de dados primários de uma empresa produtora de briquetes localizada na região dos Campos Gerais paranaense, complementados com dados da literatura. Os resultados permitiram obter o mapeamento do processo, balanço de massa de materiais e recursos. O processo da secagem na produção do briquete de finos de carvão vegetal (BFCV) dominou a maioria das categorias de impacto, exceto para depleção de ozônio, material particulado, escassez hídrica, eutrofização aquática de água doce e eutrofização aquática marinha, que foram dominadas pelo processo de briquetagem. De modo geral, os cenários avaliados apresentaram uma redução expressiva da carga ambiental na produção de BFCV nas categorias, à medida que foram retirados os processos dependentes da eletricidade, um dos *hotspots* mais significativos. O cenário da Unidade de Produção de Briquete próxima à carvoaria com o aproveitamento dos gases para a secagem dos BFCV predominou como a de menor impacto ambiental entre as alternativas analisadas.

Palavras-chaves: emissão, poder calorífico, balanço de materiais

ABSTRACT

Charcoal production in Brazil reaches an average of five million tons annually. Despite being an economically viable activity, it has some environmental liabilities such as air pollution (CO₂, NO_x, among others.) and generation of charcoal fines residue resulting from loading, transport, storage and screening of the material, since the friability is one of the characteristics of this product. The non-utilization of this waste causes environmental impact as well as economic losses. One way to add value to this waste is the transformation into briquettes, considering that they have approximately 60% of the calorific value of charcoal, therefore suitable for use as fuel in industrial facilities and domestic uses. Given the above, it is important to identify opportunities for improving environmental performance arising from the production of briquettes from eucalyptus charcoal fines, through the Life Cycle Assessment. To this end, the recommendations contained in the standards NBR 14040 and 14044 were followed. The inventory was prepared from the survey of primary data from a company producing briquettes located in the Campos Gerais region of Paraná, complemented with data from the literature. The results allowed to obtain the process mapping, material and resources mass balance. The drying process in the production of charcoal fines briquette (BFCV) dominated most of the impact categories, except for ozone depletion, particulate matter, water shortage, freshwater aquatic eutrophication and marine aquatic eutrophication, which were dominated by the briquetting process. Overall, the scenarios evaluated showed an expressive reduction in the environmental load on BFCV production in the categories as the electricity-dependent processes, one of the most significant hotspots, were removed. The scenario of the Briquette Production Unit near the charcoal plant with the use of gases for drying the BFCV predominated as the one with the lowest environmental impact among the alternatives analyzed.

Keywords: emission, heating value, balance of materials

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 — Quantidade de artigos em função dos anos de publicação.....	17
Figura 2— Distribuição geográfica dos estudos e suas principais funções.....	18
Figura 3 — Tipos de matérias-primas de biomassa considerados nos estudos.....	19
Figura 4 — Unidade funcional considerada nos estudos avaliados.	21
Figura 5 — Diversidade de sistema de produto em estudos de ACV de compactação de biomassa.	22
Figura 6 — Distribuição percentual das variantes da ACV abordados nos estudos avaliados.	23
Figura 7 — Alocação consideradas nos estudos avaliados.	30
Figura 8 — Métodos de AICV empregados nos artigos revisados.	31
Figura 9 — Categorias de impacto consideradas nos estudos.....	32
Figura 10 — Contribuição de cada atividade para os resultados de impacto para a abordagem berço-ao-portão de fábrica.....	35
Figura 11 — Contribuição de cada atividade para os resultados de impacto para a abordagem berço-ao-túmulo	36
Figura 12 — Contribuição de cada atividade para os resultados de impacto para a abordagem portão-ao-portão	37
Figura 13 — Etapas do projeto de pesquisa	39
Figura 14 — Simplificação das etapas de briquetagem	41
Figura 15 — Fronteiras do sistema considerado para o inventário da produção de BFCV.	42
Figura 16 — Inventário da produção de carvão vegetal em fornos circulares	47
Figura 17 — Inventário do transporte do carvão vegetal até a UPB.....	49
Figura 18 — Inventário do descarregamento e peneiramento do carvão vegetal	50
Figura 19 — Inventário da briquetagem	51
Figura 20 — Inventário da secagem.....	53
Figura 21 — Contribuição de cada processo na ACV para os BFCV.....	60
Figura 22 — Concentrações médias de MP em função do tempo, referentes a cada fase da carbonização	62
Figura 23 — Resultados de ACV dos cenários em relação ao cenário base.....	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1— Palavras-chave utilizadas para procura de artigos na plataforma Scopus e Google Acadêmico.....	15
Tabela 2 — Temas abordados e análise das publicações.....	16
Tabela 3 — Equações para a determinação do excesso de ar para combustão completa e volume real dos gases.....	46
Tabela 4 — Fatores de emissão dos poluentes.....	48
Tabela 5 — Análises elementar do Pinus (wt %).....	52
Tabela 6 — Cálculo estequiométrico do ar necessário para a queima do combustível.....	52
Tabela 7 — Matriz Pedigree para avaliação da qualidade dos dados obtidos.....	54
Tabela 8 — Fatores de incerteza aplicados à pontuação da Matriz Pedigree.....	54
Tabela 9 — Análise da qualidade dos dados via Matriz Pedigree para a produção de CV.....	55
Tabela 10 — Análise da qualidade dos dados via Matriz Pedigree para a produção de BFCV.....	55
Tabela 11 — Categoria de impacto, modelos de caracterização e métodos contextualizados à realidade do Brasil.....	57
Tabela 12 — Resultado da avaliação de impacto de cada uns dos cenários para a produção dos BFCV.....	65
Tabela 13 — Análises elementar do cavaco de pinus.....	90

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACV	Avaliação do ciclo de vida
AICV	Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida
ALO	Agricultural land occupation
BFCV	Briquetes de finos de carvão vegetal
CC	Climate change
CCPI	The Climate Change Performance Index
CH ₄	Metano
CO	Monóxido de carbono
CO ₂	Dióxido de carbono
CV	Carvão vegetal
EU	União Europeia
FCV	Finos de carvão vegetal
FD	Fossil resource depletion
FE	Freshwater eutrophication
FET	Freshwater ecotoxicity
GEE	Gases de efeito estufa
GWP	Global Warming Potential
HT	Human toxicity
ICV	Inventário de ciclo de vida
IR	Ionising radiation
Kcal kg ⁻¹	Quilocaloria por quilograma
kg CO ₂ eq/t CV	Quilograma de dióxido de carbono equivalente por tonelada CV
MDL	Mecanismo de Desenvolvimento Limpo
ME	Marine eutrophication
MET	Marine ecotoxicity
MP	Material Particulado
MRD	Mineral resource depletion
Mt CO ₂ e	Milhões toneladas de dióxido de carbono equivalente
NAMAS	Ações de Mitigação Nacionalmente Apropriadas
NLT	Natural land transformation
OD	Ozone depletion
PCI	Poder calorífico inferior
PCS	Poder calorífico superior
PCU	Poder calorífico útil
PMF	Particulate matter formation
PNUD	Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento
POF	Photochemical oxidant formation
TA	Terrestrial acidification
TET	Terrestrial ecotoxicity
UF	Unidade funcional
ULO	Urban land occupation
UPB	Unidade de empacotamento de CV/produção de BFCV
UPC	Unidade produtiva de carvão
WD	Water depletion

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1	DADOS GERAIS	17
2.2	OBJETIVO E ESCOPO.....	18
2.2.1	Matéria-prima	18
2.2.2	Tecnologia de densificação.....	19
2.2.3	Função e unidade funcional (UF)	20
2.3	INVENTÁRIO DE CICLO DE VIDA	22
2.3.1	Limite do sistema.....	22
2.3.2	Alocação	29
2.4	AVALIAÇÃO DE IMPACTO DO CICLO DE VIDA	30
2.4.1	Modelo de AICV	31
2.4.2	Categorias de impacto.....	32
2.5	INTERPRETAÇÃO DO CICLO DE VIDA	33
2.5.1	Análise de sensibilidade e incertezas.....	33
2.5.2	Análise de contribuição nos estudos ambientais relacionados à densificação de biomassa	34
3	METODOLOGIA E ICV.....	39
3.1	ETAPA 1: DESCRIÇÃO, MAPEAMENTO E QUANTIFICAÇÃO DO SISTEMA.....	40
3.1.1	Matéria-prima e processo de briquetagem dos finos de carvão vegetal	40
3.1.2	Definição do objetivo e escopo do estudo	41
3.1.3	Unidade funcional.....	41
3.1.4	Descrição do sistema do produto e cenários do estudo.....	42
3.1.5	Fonte de dados	43
3.2	ETAPA 2: INVENTÁRIO DO CICLO DE VIDA (ICV)	44
3.2.1	Preparação para a coleta de dados	44
3.2.2	Elaboração do inventário	44
3.2.3	Qualidade dos dados	53
3.3	ETAPA 3: AVALIAÇÃO DO IMPACTO DO CICLO DE VIDA.....	56
3.3.1	Categorias e métodos de Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida.....	56
3.4	ETAPA 4: INTERPRETAÇÃO.....	58
3.4.1	Análise de sensibilidade.....	58

4	RESULTADOS	60
4.1	RESULTADOS DA ACV PARA O CENÁRIO BASE.....	60
4.2	ANÁLISE DE SENSIBILIDADE	65
5	CONCLUSÕES	69
	REFERÊNCIAS	71
	APÊNDICE	80

1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, impulsionado pela globalização, observou-se um crescimento da necessidade do desenvolvimento de combustíveis alternativos aos derivados dos combustíveis fósseis, com o intuito de diminuir o impacto ambiental e, portanto, garantir opções técnica e economicamente viáveis (FRANKFURT SCHOOL – UNEP, 2019). Esses combustíveis, quando utilizados, podem reduzir as emissões de gases de efeito estufa (GEE), sendo assim importantes para a conservação do meio ambiente. Uma das tecnologias disponíveis é o uso da biomassa, seus produtos e coprodutos, pois tornam-se um vetor energético moderno no mundo todo, consequência do desenvolvimento de tecnologias eficientes de conversão, gaseificação e pirólise, especialmente em países desenvolvidos (NOGUEIRA, 2003).

De acordo com “*Renewable Energy Policy Network for the 21st Century*” — REN21 (2019), a China é o principal produtor de bioeletricidade, seguida pelos Estados Unidos e depois pelo Brasil. O Brasil ocupa lugar de destaque, sendo o maior produtor da América do Sul. Grande parte dessa produção advém da biomassa e representa 8,5% da energia interna disponível no país. A biomassa para fins energéticos no Brasil está classificada em três categorias, sendo uma delas a biomassa energética florestal. Dentre as possibilidades, a lenha e o carvão vegetal merecem destaque, em função das contribuições de 8,4% da parcela da oferta interna de energia nacional. Mais especificamente, o carvão vegetal é utilizado em diferentes segmentos da indústria - principalmente a siderurgia - o que sugere uma oportunidade de crescimento da biomassa e portanto da demanda por fontes de energia renováveis e limpas (EPE, 2019).

Em consonância, destaca-se a iniciativa “Projeto Siderurgia Sustentável”, implementada no Estado de Minas Gerais no ano de 2018. Uns dos resultados mais destacados neste projeto é a redução média de emissões de GEE, de 1.415 kg CO₂eq/t CV, cinco vezes mais quando comparado à meta do projeto que era de 270 kg CO₂eq/t CV, por meio do desenvolvimento e da demonstração de tecnologias avançadas e limpas de conversão na produção de carvão à base de biomassa renovável e da adoção de um arcabouço político efetivo e favorável (PNUD, 2018). Conforme o Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (PNUD), estes valores devem naturalmente ser considerados como referências preliminares para se multiplicar as soluções e implementar em mais de 130 indústrias que utilizam carvão

vegetal no processo de produção de ferro-gusa, de ferroligas e de aço no Brasil (IBÁ, 2019). Tal resultado sustenta a grande relevância da conversão limpa e eficiente de recursos de biomassa renováveis em carvão vegetal, proveniente de florestas plantadas para uso no setor siderúrgico.

Neste contexto, o carvão vegetal tem sido assinalado como uma opção considerada sustentável e tem o potencial de absorção de CO₂ emitido à atmosfera (MIRANDA SANTOS et al., 2017; MMA, 2018). No entanto, diante do significativo aumento do consumo de energia à base de carvão vegetal no Brasil para abastecer a indústria de ferro e aço, as vantagens deste produto têm sido vistas com ceticismo (CHIDUMAYO; GUMBO, 2013; LALMUANKIMA; UPADHYAYA; KATAKI, 2019; SEDANO et al., 2016). O motivo principal é que a produção de carvão vegetal é encarada como uma atividade pouco desenvolvida, com o uso de recursos rudimentares pois aproximadamente 70% do sistema de produção nacional é feita em fornos convencionais, com baixa tecnologia para o controle dos padrões de qualidade e sem eliminação dos gases emitidos no processo de carbonização (COSTA, 2012; RAAD; MELO; OLIVERIA, 2014). Villazón Montalván et al. (2019), adicionalmente, Miranda Santos et al. (2017) assinalam que existem impactos ambientais ao longo da cadeia de produção de carvão vegetal, tais como, desmatamento e degradação florestal, além da poluição do ar e disposição inadequada dos coprodutos: o licor pirolenhoso e os finos de carvão vegetal (FCV).

Embora os FCV sejam resíduos, poderiam vir a constituir uma alternativa viável para o aproveitamento na geração de energia por meio da produção dos briquetes, que são geralmente produzidos a partir de resíduos de biomassa e sofrem a adição de aglutinantes, para posteriormente serem compactados mecanicamente (BAJWA et al., 2018). Os briquetes podem substituir a lenha comum, o óleo combustível, o gás e outros combustíveis (DONATO et al., 2015).

Em consideração à relevância dos recursos energéticos dos briquetes no Brasil, uma série de estudos foi realizada, incluindo ou não aglutinantes. Oliveira (2013) avaliou as propriedades de briquetes feitos de FCV - ao utilizar parafina como aglutinante - relatando que os briquetes produzidos tiveram um aumento do poder calorífico proporcional à porcentagem do aglutinante, apresentando também alta resistência mecânica e menor teor de umidade, atingindo valores médios de 5%. Brugnera (2016) identificou as propriedades energéticas de briquetes produzidos a partir de finos de carvão vegetal aglutinado com amido de milho e glicerina como plastificante, constatando que os briquetes fabricados, em concordância com

Oliveira (2013), tiveram melhores características de resistência mecânica e apresentaram um elevado poder calorífico. Complementarmente, Simonelli et al. (2017) avaliaram a viabilidade técnica da produção de briquetes a partir de FCV e de glicerina bruta, concluindo que o aumento da concentração de aglutinante confere ao briquete uma maior resistência ao impacto, por agir como um material ligante.

Apesar da relevância do estudo dos impactos ambientais da produção dos briquetes, não há muitas publicações nacionais. Destaca-se o estudo desenvolvido por Rousset et al. (2011), no qual os autores detectaram, por meio da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), o impacto ambiental para briquetes de carvão vegetal de madeira de eucalipto com o amido como ligante. O estudo considerou a categoria de impacto do Potencial de Aquecimento Global (*Global Warming Potential - GWP*), verificando que o fornecimento de energia de 1 kg de briquete sequestrou 3,97 kg de CO₂. Importante frisar, para efeito de informação, que o estudo não avaliou outras categorias de impacto no processo de briquetagem de carvão.

Assim, mesmo com diversos estudos acerca da produção de briquetes de finos de carvão vegetal no Brasil, não há ainda um trabalho que abranja os efeitos ambientais de outras categorias de impacto, além do Aquecimento Global, baseando-se na metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida. Adicionalmente, é essencial caracterizar o sistema produtivo que compõe o ciclo de vida da produção dos briquetes, de forma a visualizar melhorias que possam influenciar no seu desempenho ambiental.

O objetivo geral desta pesquisa é avaliar o desempenho ambiental da produção de briquetes de finos de carvão vegetal de madeira de eucalipto, por meio da Avaliação do Ciclo de Vida. Para tanto, os seguintes objetivos específicos são almejados: (i) levantar o inventário da produção de briquetes de finos de carvão vegetal e (ii) identificar as contribuições de cada fase produtiva através do ciclo de vida do produto e, conseqüentemente, (iii) detectar possíveis melhorias referentes ao desempenho ambiental do processo produtivo.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Com o uso energético da biomassa ganhando impulso no setor industrial e doméstico, o processo de densificação da biomassa e seus impactos ambientais relacionados, vêm se tornando objetos de pesquisas nos últimos anos (MUAZU; BORRION; STEGEMANN, 2017). A aplicação da ACV proporciona informação sobre os efeitos causados no ambiente por esses processos. Com o intuito de identificar artigos relevantes na área de densificação de resíduos de biomassa e de análise dos impactos ambientais, foi realizada uma revisão bibliográfica utilizando as bases de dados Scopus e Google Acadêmico, considerando as publicações realizadas entre 2010 e 2020. Os termos (palavras-chave) utilizados remeteram à origem da matéria-prima que constitui o combustível obtido nos estudos; aos impactos ambientais associados e às tecnologias de processamento dos recursos dendroenergéticos. As sequências de busca foram aplicadas ao título, resumo e palavras-chave, como apresentado na Tabela 1.

Tabela 1— Palavras-chave utilizadas para procura de artigos na plataforma Scopus e Google Acadêmico

Tópico	Equação de busca
Palavras-chave específica para impactos ambientais:	<i>("Life cycle assessment" OR "LCA" OR "environmental impacts")</i>
Palavras-chave específicas para tecnologia de densificação:	<i>AND ("Briquetting" OR "pelleting" OR "densification")</i>
Palavras-chave específica para tipo de biomassa usada:	<i>AND ("biomass" OR "Charcoal fins" OR "charcoal dust")</i>

Fonte: Autoria própria

O resultado da busca exibiu 75 artigos de interesse. A técnica conhecida como bola de neve (*snowball*) foi usada para inclusão de 13 artigos na mesma linha de pesquisa que foram publicados em Google Acadêmico. A prática do *Snowball*, consiste na busca específica de estudos relacionados ao tópico de pesquisa de revisão, com o objetivo de "revelar" mais artigos potenciais citados pelos artigos encontrados nas buscas pela base de dados. Com a intenção de refinar os resultados, os resumos dos artigos foram selecionados baseando-se nos seguintes critérios: (1) existência de avaliação dos impactos ambientais da utilização de biomassa para

fins energéticos e, (2) identificação de pontos críticos (*Hotspots*) que mais contribuem para os impactos ambientais.

O resultado da primeira filtragem indicou 47 artigos relevantes, aos quais foi aplicado o *Methodi Ordinatio*, uma metodologia de revisão sistemática da literatura baseada em três fatores: (1) ano de publicação, (2) fator de impacto e (3) citações, para classificar a ordem de leitura dos arquivos de acordo com a sua pontuação final (PAGANI; KOVALESKI; RESENDE, 2015). Apesar da leitura prévia dos resumos, 24 artigos foram desconsiderados na leitura total, por não terem um nível suficientemente alto de detalhes na análise dos impactos ambientais, por não explicitarem os pontos críticos do processo e por terem sido publicados antes de 2010, totalizando finalmente 23 publicações (Ver Apêndice A). As publicações foram analisadas com base na metodologia proposta por Zumsteg, Cooper e Noon (2012), a qual propõe uma técnica para avaliar e relatar análises de dados de ACV. Os pontos específicos analisados em cada trabalho são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 — Temas abordados e análise das publicações.

Tema abordado	Análise
Dados Gerais	
Âmbito geográfico	Em que contexto regional o estudo foi preparado?
Ano	Qual foi o ano da publicação do estudo?
Objetivo e escopo	
Matéria-prima	Qual matéria-prima foi utilizada?
Tecnologia de densificação	Qual tecnologia de densificação foi aplicada?
Função e Unidade funcional	Qual unidade funcional foi aplicada? Foi declarado explícita ou implicitamente?
Inventário de ciclo de vida	
Limite do sistema	Quais processos foram incluídos no limite do sistema?
Alocação	Qual método de alocação foi aplicado?
Avaliação de impacto do ciclo de vida	
Método AICV	Qual método AICV foi aplicado?
Categoria(s) de impacto	Qual(ais) categoria(s) de impacto foi(ram) avaliada(s)?
Interpretação do Ciclo de Vida	
Análise de sensibilidade	Houve consideração de cenários adicionais?
Incerteza	Qual o modelo utilizado para representar as incertezas no estudo analisado?
Hotspots	Houve uma identificação dos processos críticos em cada categoria de impacto?

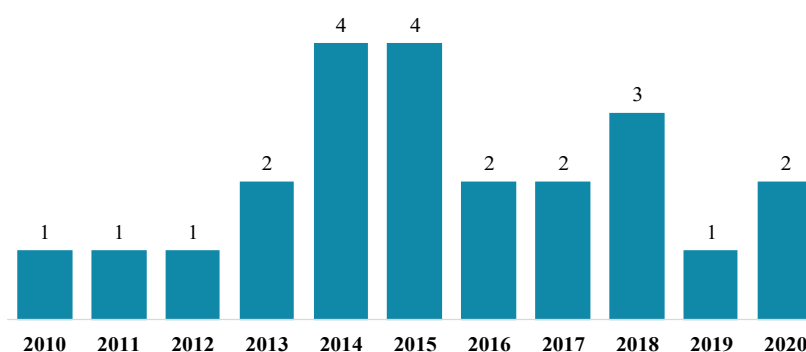
Fonte: MUENCH; GUENTHER, 2013

2.1 DADOS GERAIS

Um estudo inicial da ACV aplicando abordagem atribucional foi feito por Fantozzi e Buratti (2010), que realizaram uma avaliação do impacto ambiental da utilização de pellets de madeira para produção de energia térmica. Eles relataram que a maior dificuldade do estudo foi a falta de dados do processo de peletização, porque apenas alguns dados sobre as várias fases do processo estavam disponíveis na literatura.

Houve outros estudos adicionais sobre a densificação de biomassa (Figura 1), que mostra um crescimento modesto da produção científica até 2014/2015, anos de maior quantidade de publicações.

Figura 1 — Quantidade de artigos em função dos anos de publicação.

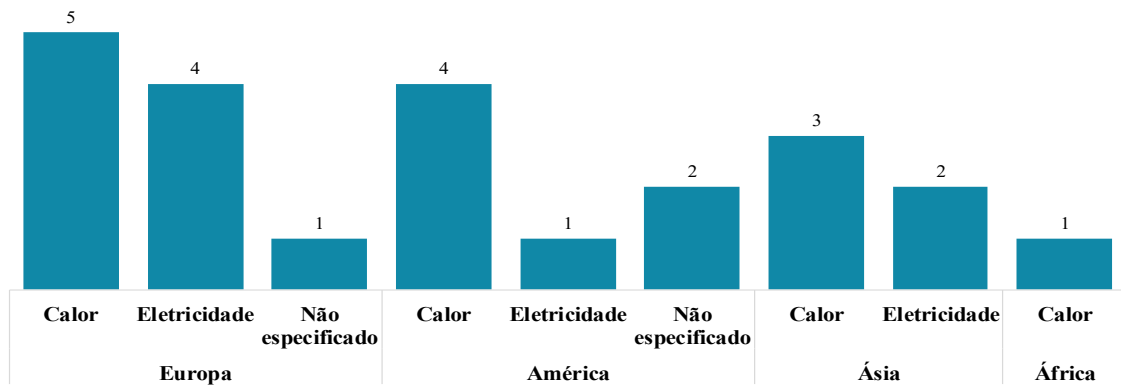


Fonte: Autoria própria

Outro aspecto relevante a considerar é o âmbito geográfico dos estudos. A Figura 2 mostra que 43,48% das ACVs de densificação da biomassa para fins energéticos foram feitas em um contexto europeu, sendo a Itália (30%) e a Suécia (20%) os países com mais estudos nesta região. Esses resultados podem ser explicados pela ênfase da Europa em aproveitar a biomassa com fins energéticos, baseando-se provavelmente nas políticas da União Europeia (UE) sobre combustíveis renováveis e bioenergia, em matéria de proteção do ambiente, alterações climáticas e energia limpa (BURCK et al., 2019; CABUZEL, 2019). A América está representada com 30,43%, em que os Estados Unidos e o Canadá constituem 42,85 e 28,57% respectivamente. Há uma semelhança notável entre as ACVs europeias, americanas e asiáticas em relação ao uso dos briquetes ou pellets obtidos, sendo que 13 dos 23 estudos (56,52%),

relatam o uso da biomassa para geração de energia em forma de calor. Em relação às demais regiões, contribuem com uma proporção menor.

Figura 2— Distribuição geográfica dos estudos e suas principais funções



Fonte: Autoria própria

2.2 OBJETIVO E ESCOPO

Os critérios da análise adotados para a revisão em relação ao objetivo e escopo contemplaram três itens: (i) matéria-prima, (ii) tecnologia de densificação, e (ii) função e unidade funcional.

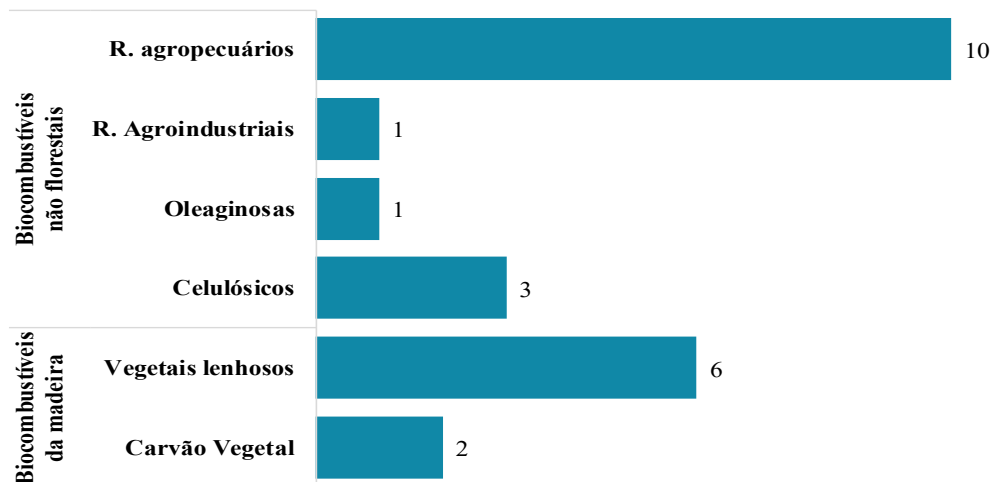
2.2.1 Matéria-prima

Os recursos energéticos da biomassa incluída nas ACVs podem ser classificados, quanto à sua origem, de três maneiras: biocombustíveis da madeira (dendrocombustíveis), biocombustíveis de plantação não florestal (agrocombustíveis) e de resíduos urbanos (NOGUEIRA, 2003).

Os combustíveis de plantação não lenhosos correspondem a 65,22% dos estudos. Os resíduos agropecuários que resultam da produção agrícola foram objeto de maior número de publicações (10 estudos: 3 de palha de azeitona, 4 de palha de milho, 2 de palha de trigo, 1 de

resíduo agropecuário); seguido pelos materiais celulósicos (3 estudos: 1 de *Miscanthus*, 1 de resíduos de árvores tropicais/resíduos de Chá, 1 de *Switchgrass*); oleaginosas (1 estudo de cachos vazios de frutas) e resíduos agroindustriais (1 estudo de bagaço de uvas). Os biocombustíveis da madeira representam 34,78% das publicações, sendo os recursos da serragem/cavacos de madeira e o carvão vegetal, os mais renomados neste grupo, 6 e 2 estudos respectivamente. Há de se considerar, porém, a forte representação da matéria-prima agropecuária e lignocelulósica com fins energéticos nas ACVs. Em parte pode ser explicada pelas políticas públicas adotadas por alguns países, com o intuito de criar um valor aos resíduos de biomassa por meio de novas tecnologias, processos e produtos sustentáveis (BURCK et al., 2019; HARVEY; ORVIS; RISSMAN, 2019; MMA, 2016; SPERANZA et al., 2017). A Figura 3 mostra esta classificação para os estudos analisados.

Figura 3 — Tipos de matérias-primas de biomassa considerados nos estudos.



Fonte: Autoria própria

2.2.2 Tecnologia de densificação

A biomassa e seus resíduos normalmente estão relacionados às dificuldades de transporte, manuseio e estocagem (KYLILI; CHRISTOFOROU; FOKAIDES, 2016; MIRANDA SANTOS et al., 2017; ROUSSET et al., 2011; TSALIDIS et al., 2014). Essas

dificuldades são em parte explicadas pela baixa densidade de alguns tipos de biomassa, o que pode acabar comprometendo o desempenho energético. Como solução, surge a tecnologia de densificação como, por exemplo, a peletização e a briquetagem, com o intuito de compactar os materiais e resíduos produzidos. A diferença entre eles é que geram produtos com dimensões distintas. Os pellets podem ter um diâmetro de 6 a 10 mm e os briquetes podem ter um diâmetro entre 30 a 100 mm (DE FONTES, P.J.; OKINO, E. Y. A; QUIRINO, W. F, 1989). Deste modo é possível obter um produto com maior densidade (em kg/m^3) e, também, uma maior densidade energética (em kcal/m^3) em relação à biomassa inicial (NOGUEIRA, 2003).

Outras vantagens da densificação da biomassa são: redução do teor de umidade, pela aplicação da secagem (CHAI SUWAN et al., 2020; HU et al., 2014; SABA; EL BACHAWATI; MALEK, 2020; WANG et al., 2017), em alguns casos, aumento do poder calorífico (BRUGNERA, 2016; RODRIGUES et al., 2017), maior rendimento na utilização e a diminuição do teor de voláteis (DONATO et al., 2015). O uso deste tipo de produto influi de forma importante no ambiente, tendo como exemplo, o estudo feito por Li et al. (2012) que avaliaram o impacto de diferentes combustíveis: carvão mineral, gás natural, pellets de madeira e óleo combustível leve. Os autores assinalam que os pellets de madeira apresentam menores emissões de CO_2eq , quando usados como combustível no processo de secagem, apresentando uma queda considerável de 45%, 28% e 22% em comparação com carvão mineral, óleo combustível leve e gás natural, respectivamente.

Outras vias de conversão possíveis, como fermentação, liquefação, combustão direta, pirólise, gaseificação, biodigestão, craqueamento e esterificação, não estão incluídos nos estudos. As pesquisas estão representadas em 65,21, 26,08 e 8,69% à tecnologia de peletização, briquetagem e outros (operação manual e combinado), respectivamente. As ACVs de peletização têm um forte foco na biomassa lignocelulósica, pois equivale a 40% de serragem/cavaco de madeira como matéria prima nos processos analisados.

2.2.3 Função e unidade funcional (UF)

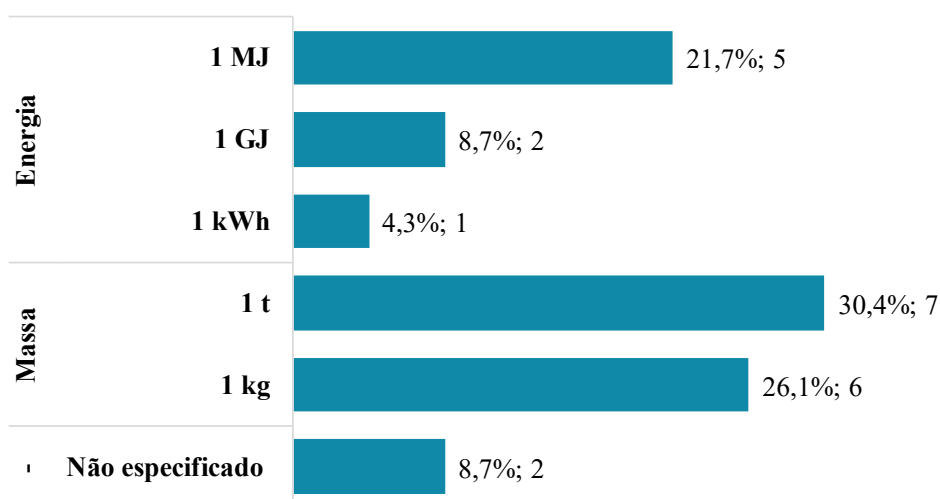
Os objetivos de uma UF são a quantificação das funções identificadas e a garantia da comparabilidade dos resultados de ACV, quando avaliados em diferentes processos ou cenários (KYLILI; CHRISTOFOROU; FOKAIDES, 2016; RAJABI HAMEDANI et al., 2019), alcançados pela definição de uma base comum, assegurando a equivalência para a qual todos

os outros dados da avaliação são relacionados (ISO, 2006). Na presente revisão, as principais funções dos sistemas de produtos avaliados foram a geração de eletricidade e a geração de calor, conforme apresentado na Figura 2.

Uma grande porcentagem das ACVs (86,95%) declara explicitamente a UF, entretanto, alguns estudos (13,05%) não apresentam a UF de forma pontual, mas sim, implicitamente por dados nas legendas das figuras. Nesta revisão, foi possível perceber que a mensurabilidade e uma definição precisa da UF continua sendo um problema. Tanto que essas limitações também são apontadas nas revisões dos trabalhos sobre densificação de biomassa (MUAZU; BORRION; STEGEMANN, 2017) e bioenergias (MUENCH E GUENTHER, 2013). Os autores assinalam que as UFs definidas nas ACVs de energia da biomassa não são uniformes, por exemplo, Manandhar e Shah (2017) definiram a unidade funcional como 1 tonelada métrica (t) de biomassa seca entregue na porta da biorrefinaria, enquanto Porsö et al. (2018) definiram a unidade funcional como 1 GJ de combustível (produzido em um ano). Isso representa um grande desafio no momento de realizar a comparação entre diferentes sistemas.

A Figura 4 mostra as UF usada nos estudos. Chama a atenção especialmente a adoção da UF em massa, uma vez que a biomassa com finalidade energética tem como função a geração de energia.

Figura 4 — Unidade funcional considerada nos estudos avaliados.



Fonte: Autoria própria

A Figura 4 mostra as diferentes UFs, sendo que uma tonelada (1 t) abrange 30,78% dos estudos, a mais comum na literatura. Apesar de Benetto et al. (2015) assegurarem que a UF em massa, por exemplo 1 tonelada de pellets, possa ser consistente, os autores concluem que nos estudos de ACV comparativos entre cenários, a UF adequada é a produção de 1 MJ.

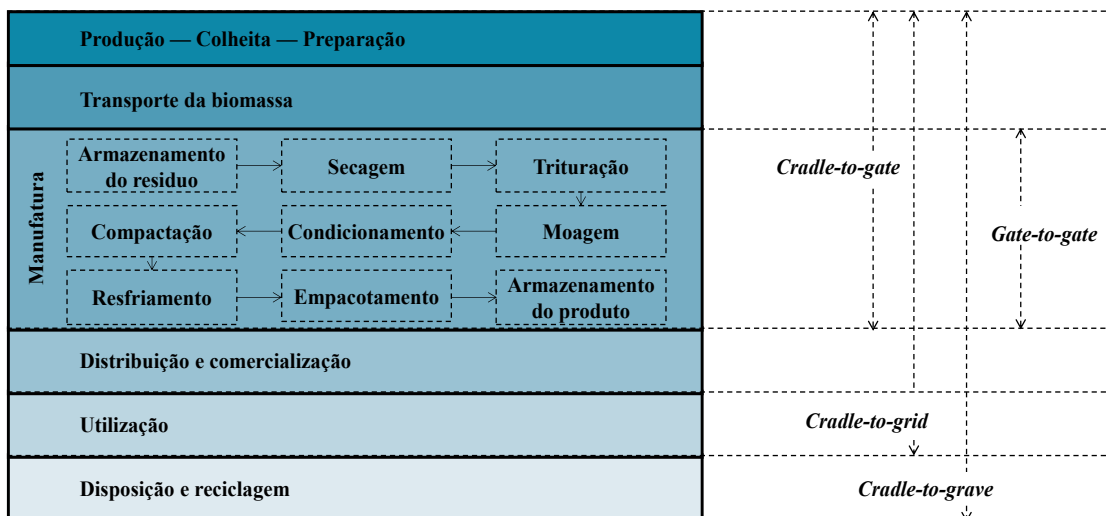
2.3 INVENTÁRIO DE CICLO DE VIDA

Os critérios da análise adotados para a revisão em relação ao inventário de ciclo de vida (ICV) contemplaram dois itens: (i) limite dos sistemas avaliados, e (ii) alocação.

2.3.1 Limite do sistema

As unidades de compactação de biomassa em termos gerais são semelhantes, adotam grande parte das mesmas operações unitárias, com algumas variações em função das propriedades físico-químicas da matéria-prima a ser processada (DIAS et al., 2012). Na Figura 5 tem-se uma visão da diversidade de escolha do sistema de produto de compactação da biomassa nos estudos de ACV.

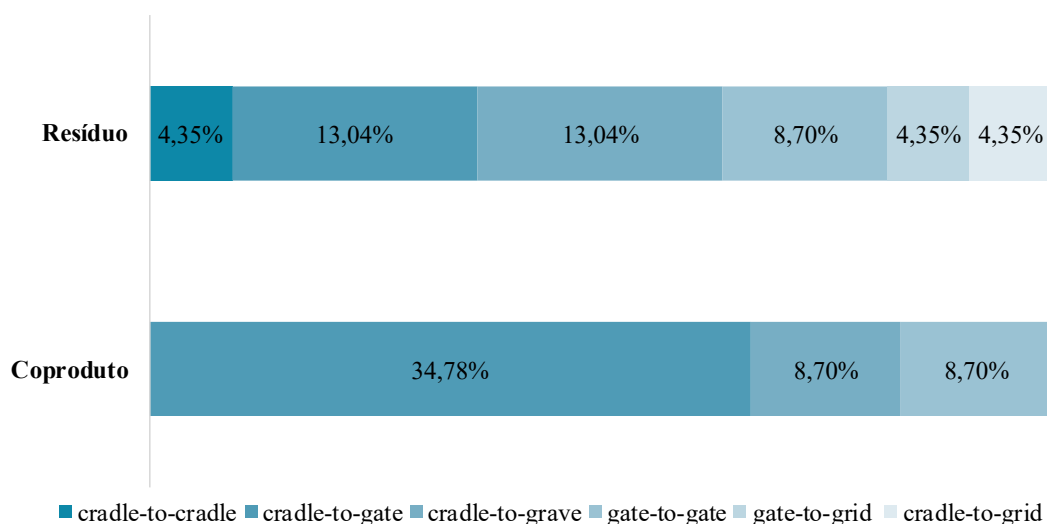
Figura 5 — Diversidade de sistema de produto em estudos de ACV de compactação de biomassa.



Fonte: Adaptado de Dias et al. (2012)

Na Figura 6 encontra-se a distribuição percentual dos estudos em relação aos limites dos sistemas dendroenergéticos, nos quais se pode observar que a variante da ACV do berço-ao-túmulo (*cradle-to-grave*) foi considerada em 24,74% dos estudos (5/23). Essas pesquisas trataram a extração e colheita da biomassa e, em alguns casos incluíam o transporte de biomassa da fonte para a usina de densificação, finalizando na fase de utilização e disposição (cinzas e embalagem). Um outro sistema de produto identificado foi do berço-ao-portão de fábrica (*cradle-to-gate*) e representou 47,83% dos estudos (11/23). Neste caso, foram analisados os processos desde a extração da biomassa até o portão da unidade de produção dos briquetes ou pellets, ou seja, antes de ser levada para o consumidor final. Os estágios de utilização e disposição final foram desconsideradas. O caso das avaliações do portão-ao-portão (*gate-to-gate*) atingiu 17,39% (4/23). Nos estudos foram feitas análises parciais de diferentes operações unitárias ao longo do processo de toda a cadeia produtiva, como indicado no item de manufatura da Figura 5. Nem todas as etapas mencionadas no processo de manufatura são aplicáveis a todas as matérias-primas consideradas nas publicações, já que as mesmas estão em função da natureza da biomassa.

Figura 6 — Distribuição percentual das variantes da ACV abordados nos estudos avaliados.



Fonte: Autoria própria

Outro sistema de produto encontrado na literatura foi do berço-ao-berço (*cradle-to-cradle*), sendo que a sua importância está na possível redução do impacto ambiental dos

produtos(VILLABONA; KAFAROV, 2018). É um tipo específico de avaliação do berço-ao-túmulo, tendo em vista que apesar de se procurar manter os recursos no sistema antrópico, entretanto, culmina na disposição final. Neste sentido, dos trabalhos científicos analisados, apenas 4,35% (1/23) considerou este tipo de avaliação. No caso específico, Villabona e Kafarov (2018) consideraram como etapa final do produto o processo de reciclagem, embora não forneçam maiores detalhes. Cenários alternativos contabilizaram 2 estudos, sendo consideradas a variante berço à rede interligada (*cradle-to-grid*) e o portão à rede interligada (*gate-to-grid*), levando esses estudos até a etapa de geração de eletricidade.

2.3.1.1 *Bens de capital*

Um importante aspecto da ACV são os bens de capital, como construções e maquinário (infraestrutura), embora seja reduzido o número de estudos que consideram esta informação, devido à complexidade da coleta dos dados e na maioria dos casos, os impactos ambientais dos bens de capital são negligenciáveis por conta do tempo de operação deles (BENETTO et al., 2015; ROUSSET et al., 2011; TSALIDIS et al., 2014; WANG et al., 2017). Em consonância, Silva et al. (2018) fizeram um estudo da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) de alguns produtos de construção, com e sem a infraestrutura, por meio da análise de Monte Carlo para calcular a incerteza causada pelos fluxos de bens de capital. Os autores identificaram uma incerteza alta, embora assinalem que é uma área de oportunidade limitada, pelo fato que alterar os bens de capital é difícil, devido aos investimentos requeridos, além do esforço para coleta de dados destes fluxos. Esta constatação também foi alcançada no estudo do Centro de Avaliação da Sustentabilidade do Ciclo de Vida (Gyro), em que se considerou a ACV ambiental, social e econômica, notou-se que apesar da construção civil ter grande impacto, a melhoria era limitada pelo fato da infraestrutura já estar montada (UGAYA et al., 2020), que foi semelhante à investigada nesse estudo. Esta tendência foi observada nos estudos avaliados, pois 52,15% (12/23) excluíram os impactos ambientais advindos dos bens de capitais e infraestrutura, e incluíram só os impactos ambientais operacionais. Os 34,78% abarcaram tal informação, visando uma análise completa dos impactos ambientais e os 13,04% adicionais não especificaram ter abordado a construção e os componentes característicos de um sistema de densificação de biomassa nos seus estudos.

2.3.1.2 Etapas padrão da densificação da biomassa in natura na variante portão-ao-portão

Um das recomendações importantes na coleta dos dados é evitar unidades de “caixa preta” e fornecer dados individuais que estejam relacionados ao sistema. Isso é relevante para garantir a precisão dos dados, diminuir a incerteza e ter um bom mapeamento do processo, bem como para evitar problemas de multifuncionalidade (JRC, 2011). A seguir são apresentadas as operações unitárias pelas quais a biomassa com fins dendroenergéticos podem passar, desde a colheita da matéria-prima até a estocagem dos briquetes ou pellets produzidos.

2.3.1.2.1 Armazenamento da biomassa bruta e biomassa densificada

Os recursos densificáveis requerem uma área considerável e uma infraestrutura específica (silos e armazéns) para o armazenamento do material e redução do risco de danos microbianos. O último aspecto é importante, pois essas ações microbianas podem comprometer o poder calorífico do produto, reduzindo significativamente sua utilidade (MUAZU; BORRION; STEGEMANN, 2017). Para mantê-los em condições adequadas, sem correr o risco de degradar, é necessária a utilização de meios mecânicos de secagem (ventiladores e aquecedores). Porém, empregar estes equipamentos aumenta o consumo de energia, o que poderia trazer efeitos ambientais significativos. Por exemplo, Fantozzi e Buratti (2010) assinalaram que a armazenagem da biomassa representa 1% da energia total.

2.3.1.2.2 Pré-tratamento da biomassa

A biomassa usada geralmente apresenta um teor de umidade considerável e não tem um tamanho uniforme, portanto é necessária a implementação de operações adicionais, tais como: secagem, trituração e moagem.

2.3.1.2.2.1 Secagem

Na compactação da biomassa o teor de umidade é uma variável importante, pois seu excesso pode levar à diminuição do poder calorífico dos briquetes ou pellets, além de problemas operacionais, como entupimento na alimentação do equipamento (DONATO et al., 2015). Segundo alguns estudos, a faixa ideal do teor de umidade está entre 5 a 10% (BRUGNERA, 2016; DE FONTES, P.J.; OKINO, E. Y. A; QUIRINO, W. F, 1989; DONATO et al., 2015). O teor de umidade destes produtos depende do teor de água inicial e final e das características da biomassa. Às vezes, a matéria-prima pode ser coletada com uma umidade adequada para compactação, como folhas da árvore de café ou a palha de milho. No caso do bagaço de cana, capim e lenha, a secagem torna-se imprescindível (NOGUEIRA, 2003). Algumas alternativas usadas para a secagem da biomassa são a secagem ao sol, a utilização dos gases de combustão do pré-aquecimento do fluido térmico, forno rotativo, secagem em estufas e secadores tipo *flash*, também chamado secador de coluna, entre outros (DIAS et al., 2012). A velocidade de secagem ocorre em função da temperatura, da umidade relativa e do fluxo de ar, do tempo de exposição e das propriedades físico-químicas do material (RENDEIRO et al., 2008). Como consequência, atingir o teor de umidade ideal pode levar a um consumo considerável de energia (LI et al., 2012). Adams, Shirley e Mcmanus (2015) avaliaram os impactos ambientais associados à integração do processo de torrefação na cadeia de fornecimento de bioenergia e concluíram que o impacto relativo à produção de pellets depende fortemente das características de secagem da biomassa.

2.3.1.2.2.2 Trituração/moagem

A redução do tamanho da biomassa geralmente é feita por meio de picotador/triturador, moinho de martelo, moinho de facas ou de esferas (DE FONTES, P.J.; OKINO, E. Y. A; QUIRINO, W. F, 1989). Este estágio é de extrema importância para garantir que o tamanho de partícula seja compatível com o equipamento de compactação, além de favorecer uma secagem mais rápida e melhorar a densidade e resistência do produto final (RENDEIRO et al., 2008). O resultado final da trituração é geralmente pequenas partículas da matéria-prima original (próximo ao pó ou pedaços de alguns centímetros). A energia necessária e os impactos associados à trituração dependem do tamanho de partícula desejada e da natureza da biomassa a ser processada (BAJWA et al., 2018; TABATA; OKUDA, 2012).

2.3.1.2.3 Condicionamento

Geralmente o condicionamento acontece em dois subestágios. O primeiro deles é o peneiramento da matéria-prima que é essencial no processo de densificação da biomassa, por promover a separação do material em duas ou mais frações, com partículas de tamanhos distintos, além de evitar a contaminação do material de interesse (BAJWA et al., 2018). É realizada usando telas vibratórias metálicas com tamanhos e formatos diferentes, de acordo com o tipo de material a ser peneirado (DE FONTES, P.J.; OKINO, E. Y. A; QUIRINO, W. F, 1989). O segundo subestágio é o pré-aquecimento da biomassa, por meio do qual a temperatura de alimentação do material é elevada, propiciando a ativação dos ligantes naturais, por exemplo a lignina, ou daqueles adicionados como aglutinantes no processo, tais como o amido ou mesmo o alcatrão vegetal (NOGUEIRA, 2003). Dessa forma, é possível obter um produto final mais denso e resistente. Essa operação geralmente é realizada por meio de fricção, aquecimento em leito fluidizado ou acondicionamento a vapor, com resistência elétrica ou trocadores de calor com óleo térmico (DIAS et al., 2012). A energia necessária e os impactos associados a ela, podem ser favorecidos pelo aumento de eficiência para processar o briquete ou pellets, pois o fato de pré-aquecer resulta na diminuição da pressão necessária, pela deformação de partículas termoplásticas, sobretudo no caso do uso de rosca extrusora (BAJWA et al., 2018; DE FONTES, P.J.; OKINO, E. Y. A; QUIRINO, W. F, 1989; DIAS et al., 2012).

2.3.1.2.4 Compactação/extrusão

A compactação é um dos estágios mais importantes para a produção de pellets e briquetes (BAJWA et al., 2018). Quirino e Brito (1991) definem o processo como a forma de concentrar a energia disponível na biomassa que, quando compactada gera aglomerados sólidos denominados briquetes ou pellets. Os pellets, quando comparados com os briquetes, apresentam uma dimensão menor e são, de modo geral, fabricados por extrusão, ao contrário dos briquetes que ostentam um tamanho maior, por serem produzidos por compactação, muito embora, em alguns casos também por meio de extrusão (DIAS et al., 2012).

Geralmente, os equipamentos mais usados nesta fase são prensa peletizadora, prensa briquetadeira, prensa de pistão mecânico, prensa de pistão hidráulico, prensa de rolos, prensa extrusora de rosca, prensa com rosca cônica, prensa com rosca cilíndrica e matriz aquecida, prensa de rosca dupla, entre outras (BAJWA et al., 2018; DIAS et al., 2012; MUAZU; BORRION; STEGEMANN, 2017). Esse tipo de equipamento consome uma quantidade considerável de energia para a extrusão ou a compactação. Em alguns casos, esta operação unitária pode ser realizada de forma manual (NJENGA et al., 2014). Pode-se observar que a escolha da tecnologia de densificação desempenha um papel importante, contudo tem-se que avaliar o requerimento de compactação de acordo com a natureza da biomassa (MUAZU; BORRION; STEGEMANN, 2017).

2.3.1.2.5 Resfriamento

O material densificado geralmente sofre um aumento de temperatura, devido ao aquecimento resultante do cisalhamento entre as partículas (temperatura de superfície acima de 200°C) (DIAS et al., 2012). É importante, portanto, resfriar o produto final para evitar acidentes e realizar o empacotamento de forma adequada e facilitar seu posterior transporte à área de armazenamento (NOGUEIRA, 2003).

No geral, o resfriamento é feito à temperatura ambiente, embora também sejam usadas outras alternativas, tais como secador de caixas e/ou um resfriador de contrafluxo (BAJWA et al., 2018; DIAS et al., 2012). A adaptação desta operação torna necessária uma área específica, além de energia para garantir a secagem ou resfriamento (MUAZU; BORRION; STEGEMANN, 2017).

2.3.1.2.6 Empacotamento

De acordo com a utilização a ser dada ao produto final, deve-se considerar a necessidade de embalagem, com o objetivo de prevenir perdas pela exposição às intempéries, além de promover o manuseio, o transporte e a distribuição (DIAS et al., 2012). Este cenário é válido para o caso em que o uso dos briquetes ou pellets seja para aplicações ambiente

residencial, e comercial. Não obstante, para conversão térmica em larga escala, o produto é transportado e distribuído a granel (MUAZU; BORRION; STEGEMANN, 2017). A operação de embalagem pode ocorrer manualmente ou também por meio de máquinas de costura industrial, como alternativa para substituir costuras à mão. Esses equipamentos geralmente apresentam baixo consumo de energia (DIAS et al., 2012).

2.3.2 Alocação

Nos processos industriais é comum a obtenção de vários produtos além daquele de interesse. Nestes casos, é relevante considerar a alocação em uma ACV (AZAPAGIC; CLIFT, 1999; EKVALL; FINNVEDEN, 2001), que representa a divisão dos fluxos (de entrada e/ou saída) de um processo ou de um sistema de produto, entre os produtos. Geralmente a alocação é feita em termos de propriedades físicas (p.ex. massa, energia) ou valores econômicos (p.ex. preço dos mercados dos produtos envolvidos) (ISO, 2006).

Com o objetivo de evitar o enviesamento do resultado de uma ACV com respeito ao critério de alocação, a ISO 14044 recomenda evitar a alocação, que pode ocorrer por meio da subdivisão de processos ou pela expansão do sistema. Existem outras normas que fornecem algumas recomendações para abordar os problemas de alocação na ACV como o *Guide to PAS 2050 How to assess the carbon footprint of goods and services* (PAS 2050, 2008) e *Directive on the promotion of the use of energy from renewable sources* (EU, 2009).

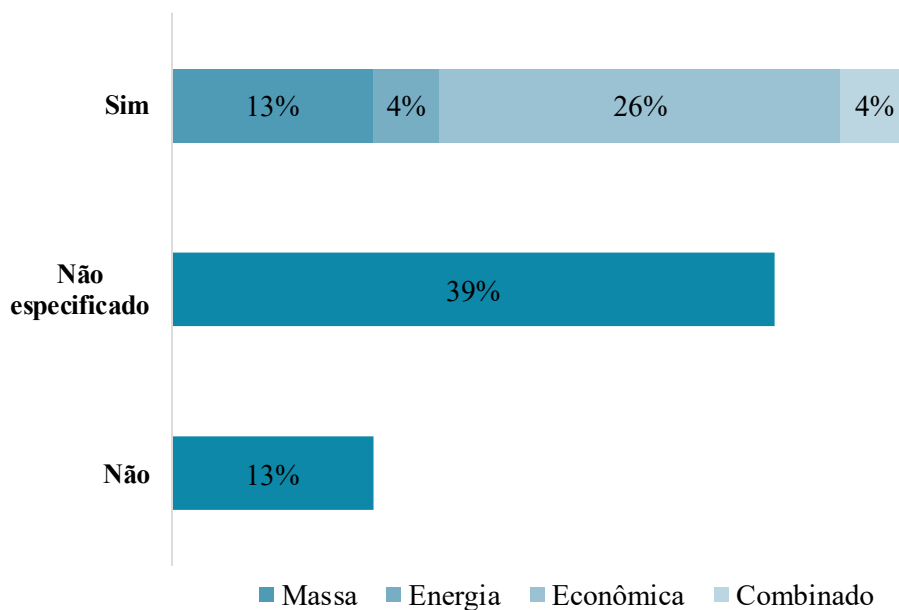
A escolha do método de alocação foi discutida por vários autores nos trabalhos avaliados. Por exemplo, Li et al. (2012) realizaram uma análise de sensibilidade para comparar métodos de alocação e identificar o impacto ambiental do processo de pelletização. Os autores identificaram que a palha de trigo (subproduto da produção de cereais) tem um preço baixo no mercado; e em consequência, ao utilizar alocação econômica a carga ambiental é baixa quando comparada com a alocação em massa.

Frente a este quadro, é importante notar que a escolha do método de alocação pode influenciar consideravelmente os resultados dos estudos das ACVs, e em consequência, a tomada de decisão com base nesses resultados (SANDIN et al., 2015). Nesta revisão, 48% dos

estudos lidaram com a alocação, sendo 26% alocação econômica, 13% alocação mássica, 4% alocação em energia e 4% combinado [mássica e econômica (Ver Figura 7)].

É interessante observar que predominou a alocação econômica, usando como referência o preço de mercado para atribuir às cargas ambientais aos coprodutos (BERGMAN et al., 2014; RAJABI HAMEDANI et al., 2019; WANG et al., 2017). Muito embora, Muench e Guenther (2013) assinalam que alocação econômica deve ser evitada, devido às incertezas advindas da flutuação dos preços dos produtos. Por outro lado, 13% dos estudos levaram em consideração as recomendações da ISO 14044 evitando a alocação, atribuindo o consumo de energia e as emissões ao produto densificado, ao contrário dos 39% que não indicaram claramente a abordagem de alocação usada no estudo.

Figura 7 — Alocação consideradas nos estudos avaliados.



Fonte: Autoria própria

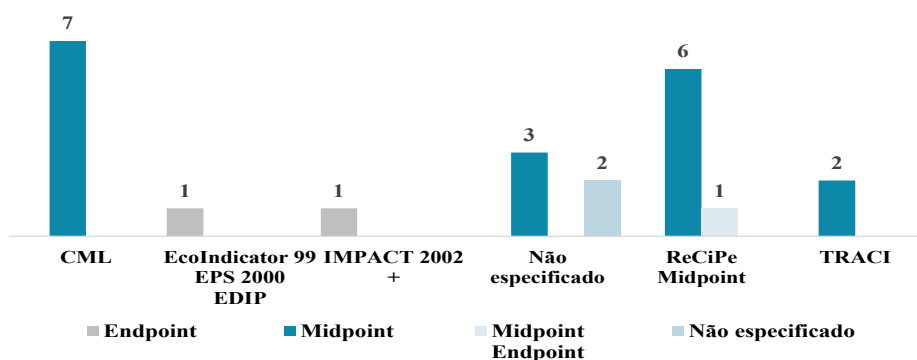
2.4 AVALIAÇÃO DE IMPACTO DO CICLO DE VIDA

Os critérios da análise adotados para a revisão, em relação à avaliação do impacto do ciclo de vida (AICV) são abordados nos seguintes itens: (i) modelo de AICV e (ii) categorias de impacto.

2.4.1 Modelo de AICV

Na fase de AICV os modelos de caracterização têm relevância pelo fato de que proporcionam os fatores de caracterização de substâncias específicas, para facilitar o cálculo da carga ambiental de cada fluxo elementar (de entrada e/ou saída), em termos da unidade comum do indicador de categoria. Estes modelos estão categorizados de acordo com sua abordagem: *Midpoint* (ponto médio) e *Endpoint* (ponto final). A primeira abordagem concentra-se em problemas ambientais que estão no meio da cadeia de causa e efeito ambiental, enquanto a segunda orienta-se aos danos no final da cadeia. Lenzen (2006) estabelece que uma abordagem *midpoint* pode ser favorável no fornecimento de informações úteis às partes interessadas, pois é menos subjetiva quando comparada com os modelos *endpoint*, embora ao serem encaminhados ao dano, apresentam mais relevância na tomada de decisões. Nos estudos analisados, os métodos de AICV utilizaram diferentes abordagens como apresentado na Figura 8.

Figura 8 — Métodos de AICV empregados nos artigos revisados.



Fonte: Autoria própria

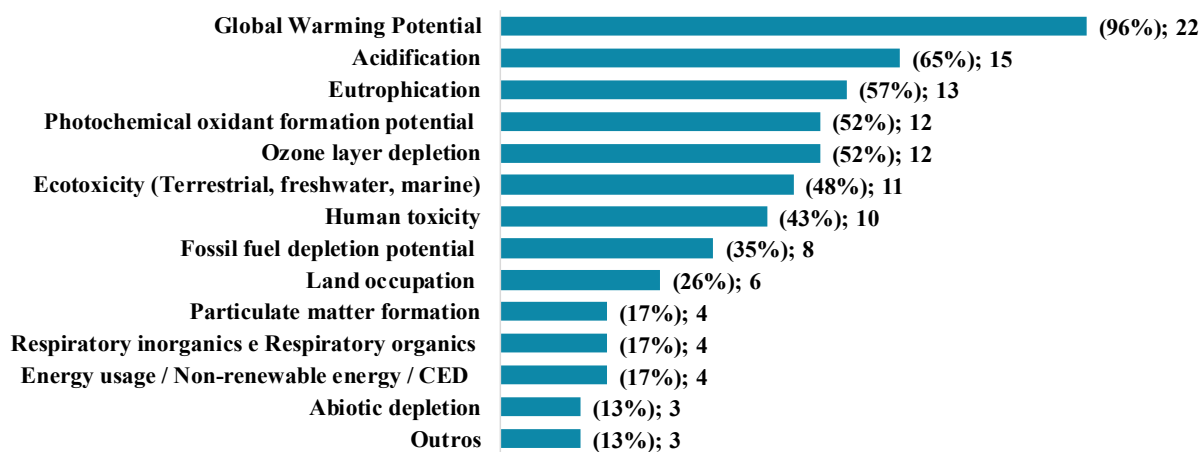
Os métodos mais usados nos estudos revisados são CML e ReCiPe, representando 30,43% (7/23) e 30,43% (7/23), respectivamente. O ReCiPe é um método de caráter combinatório, o qual tem uma abordagem mista: *midpoint* e *endpoint*. Benetto et al. (2015) avaliaram os impactos ambientais desde as duas perspectivas, orientando os resultados a problemas e a danos. Os métodos de *endpoint* Indicator Eco99, EPS 2000, EDIP representaram

4,34% (1/23) das publicações, o Impact 2002+ foi utilizado em 4,34% (1/23) dos estudos, destaca-se que esse modelo apresenta resultados *midpoint* e/ou *endpoint*, da mesma maneira que o modelo ReCiPe. O TRACI foca principalmente nas categorias de ponto médio, e representou 8,69% (2/23) dos estudos revisados. Alguns artigos não declararam explicitamente o método de caracterização implementado, embora pelas figuras e alguns resultados, foi possível, pelo menos, a identificação do nível de ação (*midpoint* e/ou *endpoint*), representando 21,73% dos estudos.

2.4.2 Categorias de impacto

Os métodos de AICV apresentam diversas categorias específicas. As categorias de impacto consideradas nos estudos podem ser observadas na Figura 9.

Figura 9 — Categorias de impacto consideradas nos estudos



Fonte: Autoria própria

As categorias de impacto mais frequentes dentre os estudos são: potencial de aquecimento global 96% (22/25), acidificação 65% (15/23), eutrofização 57% (12/23), potencial de formação de oxidantes fotoquímicos 52% (12/25) e depleção da camada de ozônio 52% (12/25) (Figura 9). A escolha das categorias de impacto para uma AICV é subjetiva,

geralmente está sujeita ao objetivo e escopo, e ao método da AICV (CLEARY, 2009). As maiores diferenças na abordagem encontram-se nas categorias: formação de material particulado, respiratórios orgânicos e inorgânicos e uso da energia as quais não são muito populares dentro dos estudos de biomassa densificada. O fato de não envolver outras categorias de impacto faz com que os estudos não reflitam o comportamento ambiental do sistema de produto (CLEARY, 2009; MUENCH; GUENTHER, 2013). Quanto mais categorias de impacto são consideradas, mais efetivo é o estudo, pois é maior o número de mecanismos ambientais avaliados. Essa particularidade permite fazer uma avaliação holística da sustentabilidade do produto de interesse (MAYER; BHANDARI; GÄTH, 2019). Embora, em alguns casos as categorias de impacto são mais complicadas de explicar, devido a que não é clara a relação dela com o sistema sob avaliação. Esta foi a limitação de estudos como de Rousset et al. (2011) e Njenga et al. (2014), que restringiram a avaliação aos impactos associados ao Potencial de Aquecimento Global dos BFCV produzidos a partir de madeira, e desconsideraram outras categorias de impactos. Em contraste, Saba, Bachawati e Malek (2020) ressaltam a importância de incluir várias categorias de impacto no estudo da ACV dos sistemas de bioenergia e escolheram o método IMPACT 2002+ com base nas categorias de impacto que o método traz, as quais são compatíveis com os requerimentos da indústria e conforme exigido pela norma ISO 14044.

2.5 INTERPRETAÇÃO DO CICLO DE VIDA

Os critérios da análise adotados para a revisão, em relação à interpretação do ciclo de vida, são abordados nos seguintes itens: (i) Análise de sensibilidade e incertezas e (ii) pontos críticos (*hotspot*).

2.5.1 Análise de sensibilidade e incertezas

As análises de sensibilidade e de incerteza são pouco frequentes nos estudos de ACV da densificação de biomassa. Muazu, Borrion e Stegemann (2017) fizeram uma revisão de

vários estudos em relação à densificação de biomassa e detectaram a necessidade de análises para compreender a grande variação nos resultados e assim melhorar a robustez das conclusões da ACV. Além disso, agregam que a incerteza advém dos parâmetros de entrada, das suposições e simplificações da estrutura do sistema de densificação.

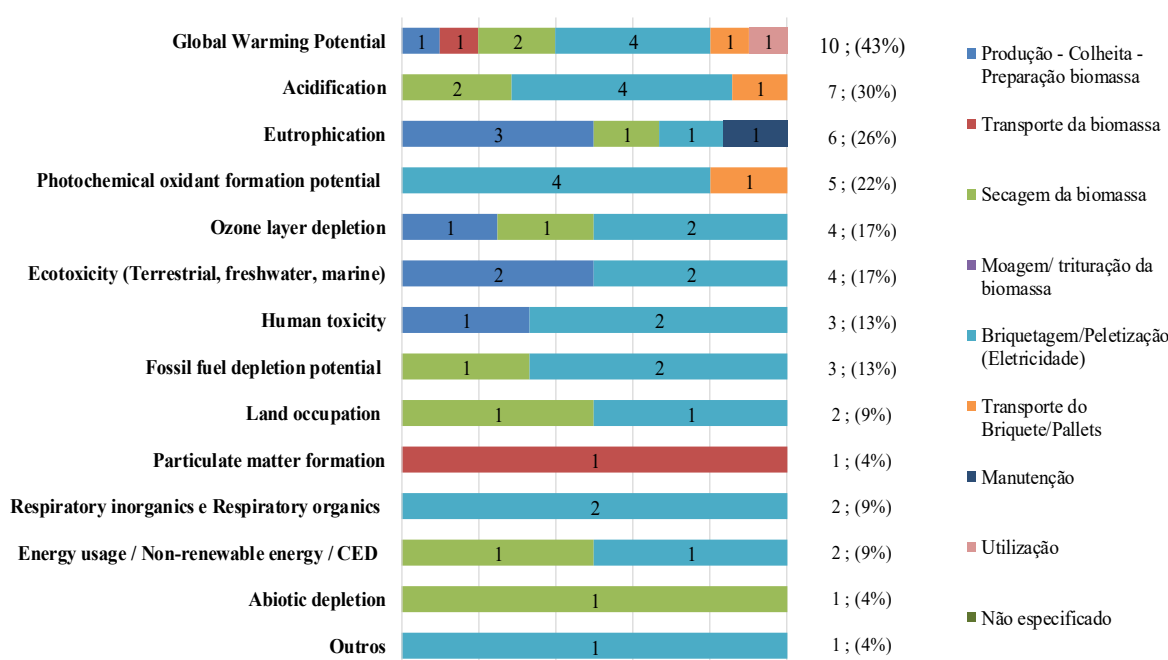
Nesta revisão foram identificados alguns estudos que realizaram uma análise da sensibilidade dos resultados da ACV, contudo não incluíam análises de incerteza, tal como no caso de De la Fuente et al. (2018), Li et al. (2012), Wang et al. (2017), entre outros. Com relação às incertezas, Manandhar e Shah (2017) identificaram 14 parâmetros de entrada com potencial de variação nas condições do processo e alguns deles são: eficiência de conversão de combustível, tamanho da planta, densidade do fardo, teor de cinzas, teor de umidade, energia para peletização, entre outros. Para a realização da análise de sensibilidade foram considerados valores pessimistas e otimistas. Adams, Shirley e Mcmanus (2015) estudaram como a energia da secagem da biomassa influenciava o resultado da ACV, por meio de valores baixos, médios e altos de energia requerida. Li et al. (2012) exploraram três cenários: (i) consumo de energia da peletização, (ii) o tipo de combustível usado no processo de secagem e (iii) o teor de umidade da palha de trigo antes da secagem. Apenas 47,82% (11/23) dos estudos realizaram análise de sensibilidade e 17,39% (4/23) forneceram informações sobre incertezas, usando como método de cálculo a Simulação de Monte Carlo. Isso indica claramente que a robustez da maioria dos resultados de ACV, fornecidos na literatura para densificação de biomassa é limitada, o que pode comprometer a confiabilidade dos resultados dos estudos e assim uma tomada de decisão acertada.

2.5.2 Análise de contribuição nos estudos ambientais relacionados à densificação de biomassa

Nesta seção são destacadas as contribuições dos processos de densificação de biomassa para cada categorias de impacto consideradas nos estudos. Considerando que grande parte dos estudos não fornecem um detalhamento dos resultados em termos numéricos, foram levadas em conta as contribuições de forma qualitativa, de acordo com cada umas das etapas pertinentes às abordagens berço-ao-portão de fábrica (*cradle-to-gate*), berço-ao-túmulo (*cradle-to-grave*) e portão-ao-portão (*gate-to-gate*), as outras abordagens representam uma porcentagem baixa do total dos estudos (8,69%) e, portanto, para fins comparativos não são pertinentes. As Figura 10, 11 e 12 resumem os principais pontos críticos identificados nos

diferentes trabalhos analisados. Os gráficos mostram para cada uma das categorias de impacto, os processos/atividades que, segundo a análise crítica dos autores, mais contribuíram. Por exemplo, na Figura 10, a categoria de Acidificação na abordagem portão de fábrica foi avaliada por 7 autores (30% do total dos estudos da revisão), dentre os quais 2, 4 e 1 atribuíram o maior impacto decorrente da secagem da biomassa, briquetagem/peletização e transporte do briquete/pellet, respectivamente.

Figura 10 — Contribuição de cada atividade para os resultados de impacto para a abordagem berço-ao-portão de fábrica

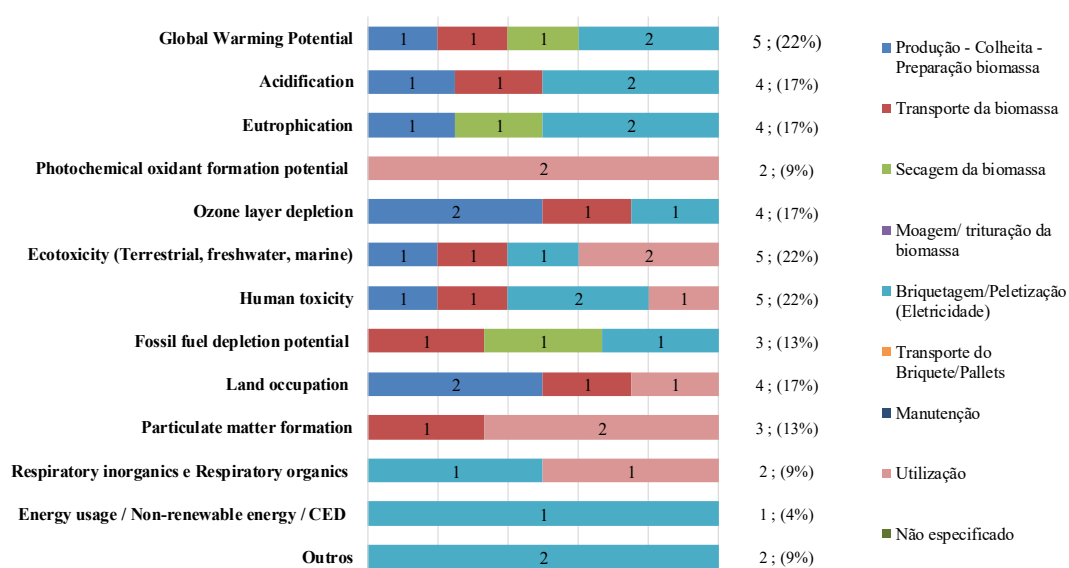


Fonte: Autoria própria

Para a maior parte das categorias de impacto (aquecimento global, acidificação, formação de oxidantes fotoquímicos, depleção de ozônio, ecotoxicidade, entre outras), o processo de maior contribuição é o de briquetagem/peletização (Figura 10). Isso remete ao fato de que o processo de briquetagem ou peletização é dominado pelo efeito do uso significativo de máquinas, geralmente com alto consumo de energia, resultando em emissões expressivas de CO₂ e CH₄ (LI et al., 2012), que contribuem significativamente, por exemplo, à categoria de aquecimento global. O transporte também teve a sua participação, como é descrito no trabalho do Rousset et al. (2011). Os autores incluíram o transporte rodoviário dentro do país e transporte marítimo do Brasil para os EUA, o que gerou um impacto alto pelo consumo de diesel. É

importante frisar a forte influência das emissões do (CO₂), (N₂O) e (CH₄) nos impactos. A quantificação das emissões dos compartimentos ambientais (ar, água e solo) é muito importante para medir a carga ambiental de cada estágio na densificação de biomassa. É interessante observar que, para atingir o teor necessário de umidade da biomassa, pode ocorrer um consumo considerável de energia e, conseqüentemente, um aumento expressivo dos impactos, como no caso do trabalho relatado por Adams, Shirley e Mcmanus (2015) e Li et al. (2012), que identificaram a secagem da biomassa como uma atividade com efeitos significativos. A produção, a colheita e a preparação da biomassa são estágios com contribuição na eutrofização, considerando que as biomassas usadas nos estudos incorporaram o uso de fertilizantes na produção, como é o caso do relatado por Li et al., 2012. Por outro lado, a produção de eletricidade, dos equipamentos usados na densificação, produção e utilização de combustível são fatores-chave na categoria de eutrofização.

Figura 11 — Contribuição de cada atividade para os resultados de impacto para a abordagem berço-ao-túmulo

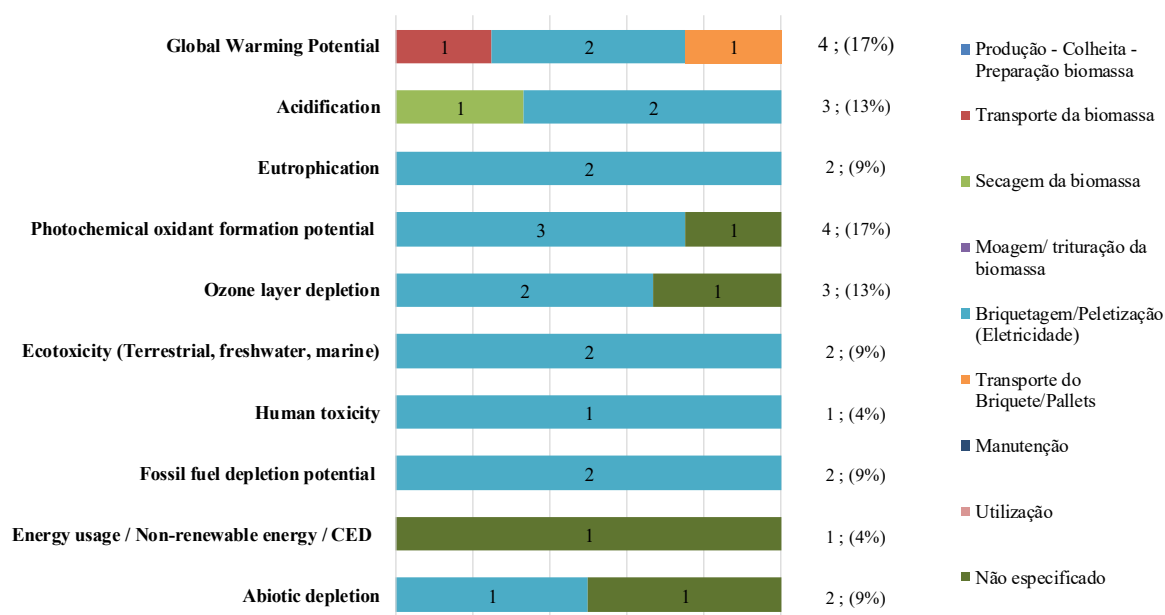


Fonte: Autoria própria

Quanto à abordagem berço-ao-túmulo (*cradle-to-grave*), os impactos são semelhantes ao berço-ao-portão de fábrica, sendo os processos de briquetagem/peletização os mais influentes. Um aspecto importante para frisar é que as categorias de impacto do potencial de

formação de oxidantes refletem como a densificação destes produtos podem impactar (Figura 11), tal como reportado por Wang et al. (2017) e Benetto et al. (2015). Estes impactos muitas vezes ocorrem devido à mistura de poluentes secundários formados por reações entre os óxidos de nitrogênio e compostos orgânicos voláteis (GAD, 2014) liberados na queima incompleta e evaporação destes produtos, ou outros combustíveis e solventes (NOGUEIRA, 2003).

Figura 12 — Contribuição de cada atividade para os resultados de impacto para a abordagem portão-ao-portão



Fonte: Autoria própria

É oportuno verificar os impactos salientados pelos autores nos estudos para a abordagem portão-ao-portão (Figura 12) em que se mostrou mais uma vez o processo de briquetagem/peletização como o mais importante. Por exemplo, os trabalhos mostram que a acidificação é fortemente influenciada pelo processo de briquetagem/peletização. O uso de carvão para gerar eletricidade, inclusive com o descarte de resíduos são fatores-chave na categoria de acidificação. Esse resultado é devido, na maior parte, aos processos unitários considerados, com destaque para os equipamentos com motor movido por meio de combustíveis fósseis, como no caso do De la Fuente et al. (2018). Outra categoria afetada por este estágio é a depleção da camada de ozônio, cujos impactos podem ser explicados pelo uso

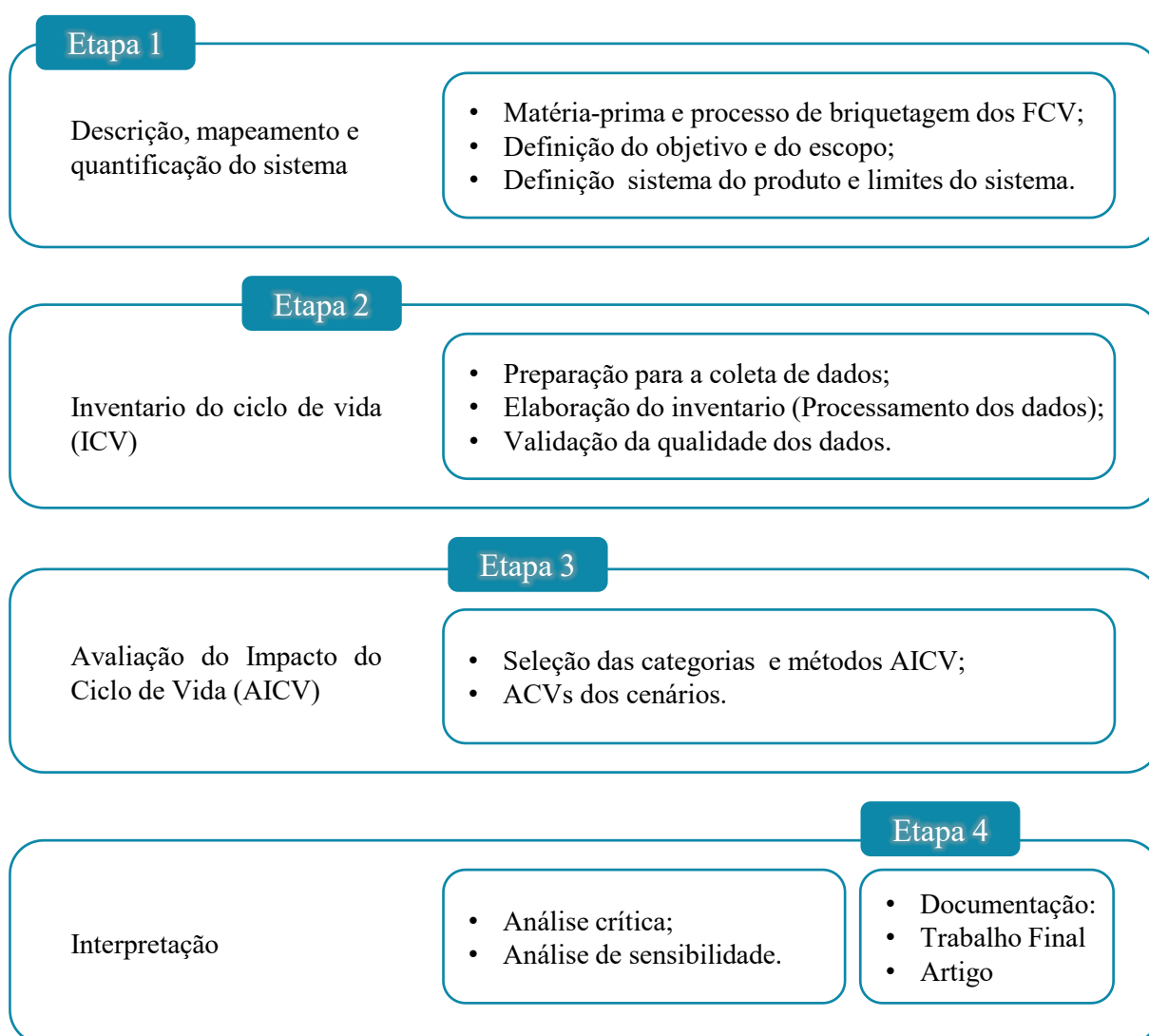
de combustíveis fósseis, gerando a emissão de halogêneos e formação de foto-oxidantes (PRASAD; KAKANI; REDDY, 2017).

Concluindo, a abordagem de diferentes limites do sistema pode gerar variações dos resultados, dificultando a identificação correta do perfil ambiental do produto e prejudicando a tomada de decisões (IGOS et al., 2019; MUAZU; BORRION; STEGEMANN, 2017). Apesar dessas variações nos impactos, fica claro que o processo de briquetagem/peletização poderia ser um processo-chave para implementação de melhorias que possam diminuir a sua predominância no impacto global.

3 METODOLOGIA E ICV

O objetivo deste capítulo é descrever os procedimentos e métodos para a elaboração da ACV dos BFCV, conforme as etapas apresentadas na Figura 13. Cabe salientar que o estudo foi desenvolvido de acordo com os requisitos estabelecidos pelas Normas Internacionais ISO 14040/2006, 14044/2006 e Guia Qualidata do Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia (IBICT, 2017) que especificam os princípios e a estrutura da ACV.

Figura 13 — Etapas do projeto de pesquisa



Fonte: Autoria própria

3.1 ETAPA 1: DESCRIÇÃO, MAPEAMENTO E QUANTIFICAÇÃO DO SISTEMA

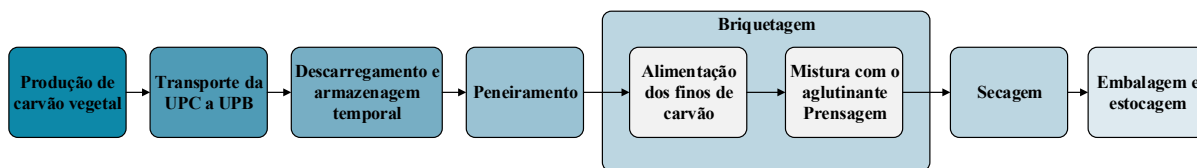
Uma visão geral do processo é apresentada na seção 3.1.1, onde são assinaladas as operações unitárias do processo de densificação dos FCV.

3.1.1 Matéria-prima e processo de briquetagem dos finos de carvão vegetal

Para a fabricação dos briquetes de finos de carvão vegetal (BFCV) foram necessário finos de carvão vegetal (FCV), amido de milho e água. Os FCV advieram da produção de CV da madeira de eucalipto da espécie *E. dunii*. Esses foram gerados pelo carregamento, transporte, armazenamento e peneiramento do material, dado que este produto possui baixa resistência mecânica (MIRANDA SANTOS et al., 2017; NJENGA et al., 2014; ROUSSET et al., 2011). O amido foi utilizado com o intuito de favorecer a aglutinação dos FCV. A água foi adicionada para facilitar a alimentação da mistura na prensa de briquetagem. (DE FONTES, P.J.; OKINO, E. Y. A; QUIRINO, W. F, 1989).

O processo de produção dos BFCV apresenta-se na Figura 14. O carvão vegetal foi produzido em uma carvoaria constituída por 29 fornos circulares de alvenaria, sem queima de gases - com capacidade nominal de 16 st (metro estéreo) de madeira enforada para cada forno. A Unidade de produção de carvão (UPC) e a unidade de empacotamento do CV/Produção de briquetes (UPB) está localizada na região dos Campos Gerais no Estado do Paraná, sendo a distância entre elas de 97 km. Portanto, o CV foi transportado em um caminhão até à empacotadora. O descarregamento foi manual e o CV foi armazenado temporariamente em uma parte do galpão de uma área de mil m². O CV foi depositado em uma peneira vibratória para realizar a separação do CV e os FCV (15 mm). O FCV e o amido foram alimentados manualmente na extrusora e a dosagem foi feita de forma automatizada. Finalmente, os BFCV foram secados em uma estufa com circulação de ar quente, a uma temperatura média aproximada de 75°C.

Figura 14 — Simplificação das etapas de briquetagem



Fonte: Autoria própria

3.1.2 Definição do objetivo e escopo do estudo

Para alcançar o objetivo proposto foi conduzida a ACV conforme: (i) unidade funcional (UF), (ii) sistema do produto e (iii) fonte de dados.

3.1.3 Unidade funcional

A unidade funcional foi definida como a produção de 1 MJ de energia para geração de calor útil (BENETTO et al., 2015; FANTOZZI; BURATTI, 2010; RAJABI HAMEDANI et al., 2019; SABA; EL BACHAWATI; MALEK, 2020). Foi considerado o poder calorífico superior (PCS) do briquete produzido no estudo de DONATO et al. (2015) de $6783,5 \text{ kcal} \cdot \text{kg}^{-1}$. O poder calorífico inferior (PCI) foi determinado baseado na norma (ABNT) NBR 8633/1984. Para realizar o cálculo do poder calorífico útil (PCU; $\text{kcal} \cdot \text{kg}^{-1}$) dos briquetes foi utilizada a Equação 1 (FERREIRA et al., 2014), onde PCI representa o poder calorífico inferior a 0% de umidade ($PCI = PCS - 324$); U é o teor de umidade dos briquetes, em base úmida (%); no caso do estudo a umidade média dos briquetes é 10%, conforme no resultado do trabalho do DONATO et al. (2015)

$$PCU (\text{kcal} \cdot \text{kg}^{-1}) = [PCI \times (1 - U)] - 600U \quad \text{(equação 1)}$$

$$PCI = 6783,5 \text{ kcal} \cdot \text{kg}^{-1} - 324 \text{ kcal} \cdot \text{kg}^{-1} = 6459,5 \text{ kcal} \cdot \text{kg}^{-1}$$

$$PCU = [6459,5 \text{ kcal} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot (1 - 0,1)] - 600 \cdot 0,1 = 5753,55 \text{ kcal} \cdot \text{kg}^{-1}$$

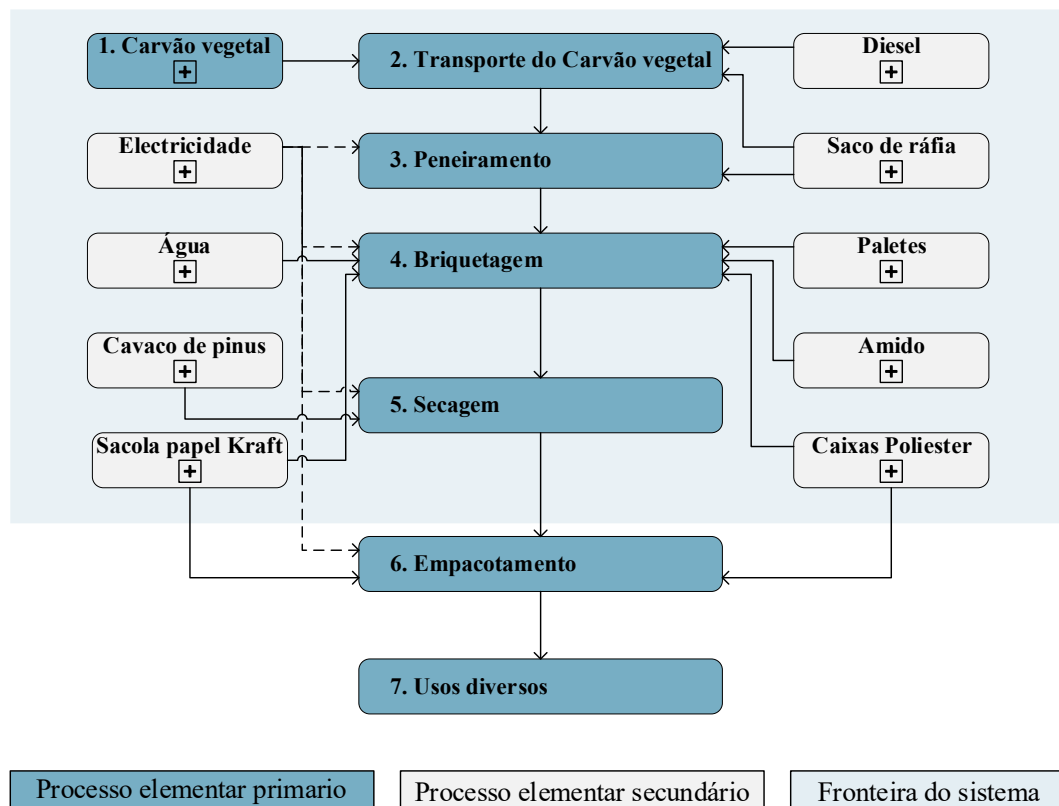
$$PCU = 24,07 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

Consequentemente, fluxos de referência de 0,04 kg de BFCV foram considerados para atender à unidade funcional.

3.1.4 Descrição do sistema do produto e cenários do estudo

Os processos incluídos foram: (1) produção de carvão vegetal, (2) transporte do carvão da carvoaria até a briquetadeira; (3) peneiramento; (4) briquetagem e (5) secagem (Figura 15).

Figura 15 — Fronteiras do sistema considerado para o inventário da produção de BFCV.



Fonte: Autoria própria

Neste estudo não foi considerado o armazenamento do CV e do briquete, pelo fato de ser feito manualmente. Também foi excluído o empacotamento. Alguns processos auxiliares (por exemplo, limpeza e manutenção), bem como os protocolos relativos aos resíduos e o descarte foram excluídos do estudo. As cargas ambientais relativas à produção dos equipamentos e infraestruturas requeridas para o desenvolvimento dos processos envolvidos também foram excluídas, seguindo as recomendações de alguns trabalhos que consideram seu aporte ao balanço global baixo (LECHÓN et al., 2005; PORSÖ et al., 2018; ROUSSET et al., 2011; SABA; EL BACHAWATI; MALEK, 2020; TSALIDIS et al., 2014).

O sistema de controle (sistema de controle de temperatura, vazão automatizada) no sistema de produção BFCV foram desconsiderados, pois espera-se uma contribuição baixa nos impactos ambientais (WANG et al., 2017).

O processo de transporte do material de embalagem para o local de fabricação e o processo de coleta e descarte foram excluídos dos limites do estudo. Além disso, a fase de uso (i.e., combustão dos briquetes produzidos) não foi incluída, pois está fora do sistema do produto a ser considerado.

Os fluxos de massa e energia do modelo tecnológico, ou seja, eletricidade, água, cavaco de pinus, diesel, papel *Kraft*, saco de rafia, amido, palete de madeira e poliéster não foram caracterizados, mas obtidos a partir do banco de dadosecoinvent 3.5 modelo *cut-off*.

3.1.5 Fonte de dados

O levantamento dos fluxos do processo de produção de carvão vegetal foi feito durante uma visita técnica realizada no mês de dezembro de 2019 em uma UPC localizada no Estado do Paraná. Nesta coleta *in loco* foram feitas observações das instalações, equipamentos, processos, procedimentos operacionais e medição de material particulado nos estágios da carbonização. O inventário foi complementado com informações contidas no trabalho de Miranda Santos et al. (2017), tais como: rendimentos e emissões.

Por outro lado, as informações da briquetagem dos FCV são oriundas do levantamento *in loco* realizado durante o mês de outubro de 2019 e junho de 2020, em uma UPB localizada na região dos Campos Gerais paranaense. As informações das emissões do processo de

transporte foram calculadas com base no método do guia técnico para preparar inventários nacionais de emissões: parte B-emissões de transporte rodoviário (EEA, 2019), como explicado no item 3.2.2.2. As emissões pela queima do cavaco foram calculadas considerando a estequiometria da combustão (SENGER, 2015), pertinentes ao sistema estudado.

3.2 ETAPA 2: INVENTÁRIO DO CICLO DE VIDA (ICV)

Esta seção é composta por: (i) preparação para a coleta de dados, (ii) elaboração do inventário e (iii) qualidade dos dados.

3.2.1 Preparação para a coleta de dados

Na visita técnica realizada em outubro do 2019, foi seguido fisicamente o fluxo do processo para compreender a estrutura do sistema da produção dos BFCV. Essa primeira aproximação ao processo permitiu a elaboração da folha de coleta de dados (Apêndice B), necessária para o alcance dos objetivos do estudo em questão. Por outro lado, realizou-se o preparo do protocolo de campo para a coleta *in loco* do material particulado na carvoaria e na UPB, estabelecendo procedimentos para padronizar as atividades, considerando a fase de preparação dos filtros em laboratório, a calibração dos equipamentos para medição de material particulado, a coleta das amostras e a realização das pesagens das amostras.

3.2.2 Elaboração do inventário

Foram quantificados os fluxos de energia e materiais da produção de BFCV, considerando o limite em torno do sistema (Figura 15) e o seu vínculo com a produção. Para cada um dos subsistemas foram coletados os dados e desenvolvidos procedimentos de cálculo, quando necessário, a partir dos quais foi possível definir as cargas ambientais associadas. Os

dados secundários foram baseados na literatura e da base de dados de ecoinvent (v 3.5). O estudo considerou apenas a produção dos BFCV como um sistema independente. Nesse sentido, só foram consideradas entradas e saídas relacionadas à produção dos BFCV, detalhadas a seguir:

3.2.2.1 Inventário da produção de carvão vegetal em fornos circulares

Foram coletadas informações para a produção de carvão vegetal em fornos circulares sem queima de gases, tais como: produtos da carbonização, separados em frações, referentes ao carvão (fração sólida), à fração condensável (líquida) e à fração não condensável (gasosa). As emissões da combustão da madeira foram calculadas por meio do equilíbrio termodinâmico das espécies que existem na mistura dos gases de saída e de acordo com as porcentagens de conversão definidas na literatura (MIRANDA SANTOS et al., 2017).

A madeira de eucalipto da espécie *E. dunii*, com uma umidade de 15,7% foi a matéria-prima usada nesse estudo. A fornada foi feita com o forno limpo, isto é, sem rejeitos de processos anteriores. O carregamento da madeira e o descarregamento do material resultante no forno foi manual. De acordo com o trabalho de Miranda Santos et al. (2017), do total de madeira seca enfiada, 37,5% resultaram em material sólido (29,1% carvão, 8% atíços e 0,4% finos) e os 62,5% restantes resultaram em gases (dos quais 37% gases não condensáveis e 63% gases condensáveis).

Em relação ao material particulado (MP), foram feitas coletas para cada uma das fases da pirólise da madeira: torrefação, carbonização, fixação e descarregamento do carvão vegetal do forno. Foi excluída a secagem, por envolver a remoção só de umidade. As amostras foram coletadas em triplicata usando cassetes de plástico e filtros de éster de celulose (37 mm de diâmetro e 0,8 μm de porosidade), por meio de bomba portátil (*Sensidyne GilAir 5*), a vazões de 2 L min^{-1} e tempos de amostragem variando de 70 min a 210 min. Antes e após as coletas, os filtros foram colocados em dessecador por 24h para condicionamento e a massa do MP coletado foi obtida por análise gravimétrica, realizando pesagem dos filtros em uma balança analítica (*Mettler Toledo*) com resolução de 0,0001 g. Importante frisar que o mesmo procedimento de coleta de MP foi adotado nos processo da produção dos BFCV. Para definir o fator de emissão do MP (EF_{MP}) gerado no processo de carbonização foram levados em conta o

volume total dos gases – (V_{Total} ; m^3), a concentração de MP amostrado *in loco* (X_i ; $mg \cdot m^{-3}$), e a quantidade de madeira [em base seca (kg)] usada no processo, como descreve a equação 2 (FRANÇA et al., 2012).

$$EF_{\text{MP}} = \frac{[X_i] \cdot V_{\text{total}}}{m_{\text{base seca}}} \quad \text{(equação 2)}$$

Dada a indisponibilidade de equipamentos de medição de vazão de gases, foi necessário realizar o cálculo do volume dos gases. Para tanto, foram determinadas quais espécies encontram-se nos produtos de combustão e suas proporções na mistura em equilíbrio. Foram usadas as equações para o cálculo dos volumes de ar e de produtos de combustão (NOGUEIRA, 2003) descritas na Tabela 3, para obter o volume total dos gases (V_{Total}). A metodologia dos cálculos do equilíbrio termodinâmico das reações de combustão está detalhada no apêndice C.

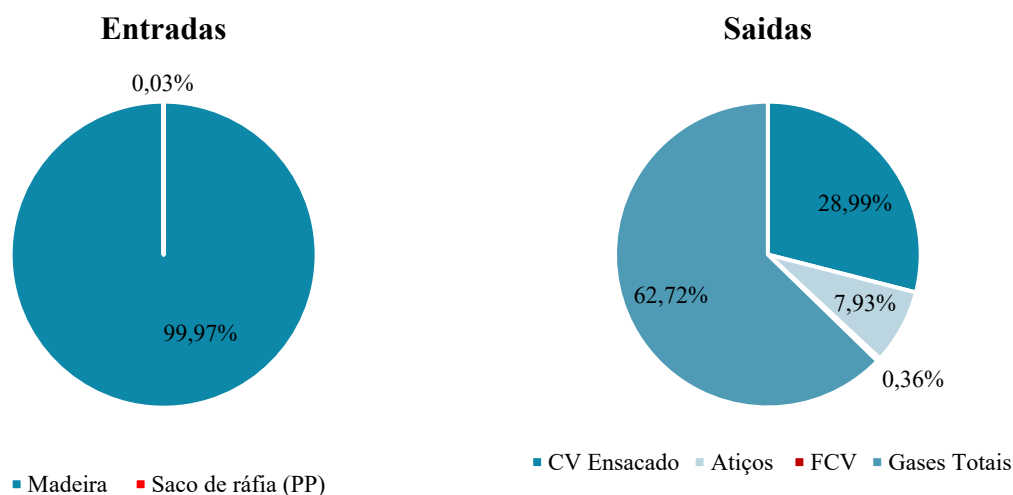
Tabela 3 — Equações para a determinação do excesso de ar para combustão completa e volume real dos gases

Parâmetro	Equação
V_a^0	Volume teórico do ar (sobrescrito “t” refere-se ao conteúdo dos elementos no combustível, % em base úmida). $V_a^0 = 0,0889 \cdot (C^t + 0,375 \cdot S^t) + 0,265 \cdot H^t - 0,0333 \cdot O^t$
V_g^0	Volume de gases teóricos ($\alpha=1,0$) $V_g^0 = V_{\text{RO}_2} + V_{\text{N}_2}^0 + V_{\text{H}_2\text{O}}^0$ Volume de gases triatômicos: $\text{RO}_2 = \text{CO}_2 + \text{SO}_2$ $V_{\text{RO}_2} = 0,01866 \cdot (C^t + 0,375 \cdot S^t)$ Volume teóricos de nitrogênio $V_{\text{N}_2}^0 = 0,79 \cdot V_a^0 + 0,008 \cdot N^t$ Volume teórico de vapores de água $V_{\text{H}_2\text{O}}^0 = 0,111 \cdot H^t + 0,0124 \cdot W^t + 0,0161 \cdot V_a^0$
$V_{\text{Total}} = V_g$	Volume real de gases $\alpha = \frac{21}{21 - (O_2 - 0,5 \cdot \text{CO} - 0,5 \cdot \text{H}_2 + 2 \cdot \text{CH}_4)}$; O_2 =Conteúdo de oxigênio nos gases, % $V_g = V_g^0 + 1,0161 \cdot (\alpha - 1) \cdot V_a^0$

Fonte: Nogueira, (2003)

O fator de emissão para o material particulado foi calculado usando a equação 2. O Inventário da produção de carvão vegetal em fornos circulares pode ser visto a partir da Figura 16.

Figura 16 — Inventário da produção de carvão vegetal em fornos circulares



Fonte: Autoria própria

3.2.2.2 Inventário do transporte do carvão vegetal até a UPB

Para o transporte do carvão vegetal foi usado um furgão Volkswagen 19-330, Constellation, 2p, (diesel) (E5) com peso bruto total (PBT) homologado para 16 t capacidade de carga 30 t, ano de fabricação 2014. A distância média percorrida no transporte da UPC até a UPB era de 97 km.

Baseando-se na metodologia da EEA (2019), foi possível calcular o consumo médio de diesel para o veículo. De acordo com a metodologia, o veículo usado tem um código *Nomenclature For Reporting* (NFR) 1.A.3.b.iii, uma subcategoria *rígida 28 - 32t*, movimentado por diesel e regido pela legislação de emissão euro V (>2013). Deste modo, foi possível identificar os fatores de emissão (tabela 4) e adaptá-los diretamente à Equação 3, onde E_i é a emissão de poluente i [g]; $FC_{j,m}$ é o consumo de combustível da categoria de veículo j usando

combustível m [kg]; $EF_{i,j,m}$ é o fator de emissão do poluente específico do consumo de combustível i para a categoria de veículo j e combustível m [g/kg].

$$E_i = \sum_j (\sum_m (FC_{j,m} \cdot EF_{i,j,m}))$$

equação 3

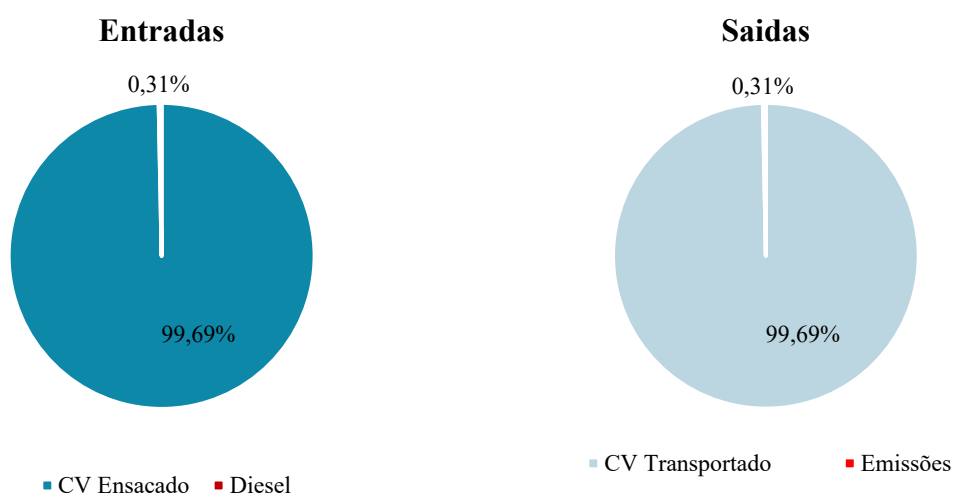
Tabela 4 — Fatores de emissão dos poluentes

POLUENTE	g de poluente/kg de combustível		
	Média	Min	Max
CO	7,58	5,73	10,57
NMVOC	1,92	1,33	3,77
NO _x	33,37	28,34	38,29
PM	0,94	0,61	1,57
N ₂ O	0,051	0,03	0,089
NH ₃	0,013	0,01	0,018
ID(1,2,3-cd) P	7,90E-06	7,30E-06	8,60E-06
B(k)F	3,44E-05	3,18E-05	3,72E-05
B(b)F	3,08E-05	2,84E-05	3,33E-05
B(a)P	5,10E-06	4,70E-06	5,50E-06
Pb	5,20E-05	1,60E-05	1,94E-04
CO ₂	3,1690	-	-
SO ₂	0,00001	-	-

Fonte: adaptado de EEA (2019)

Nesse estudo foi usado o fluxo de Diesel “*market for diesel | diesel | Cutoff, U – BR*”, do banco de dados ecoinvent (V 3.5). Após ser descarregado o carvão vegetal, o caminhão volta vazio para a carvoaria. A Figura 17 ilustra o inventário do transporte do carvão vegetal até a UPB.

Figura 17 — Inventário do transporte do carvão vegetal até a UPB



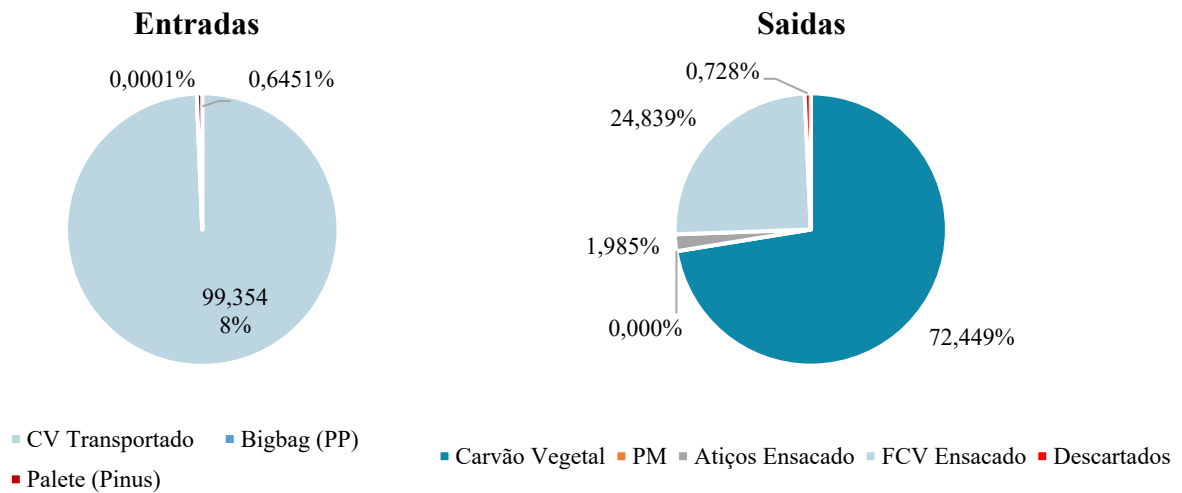
Fonte: Autoria própria

3.2.2.3 Inventário do descarregamento e peneiramento do carvão vegetal

O inventário foi elaborado a partir de dados primários. O subprocesso inicia com o descarregamento do carvão manualmente. Em seguida, inicia a etapa da separação do CV e dos FCV em uma esteira que funciona com uso de uma peneira vibratória (<15 mm), com motor de 1CV a 1750 rpm. Do total de CV produzido da UPC, 25% são classificados como finos.

Considerando uma umidade média de 5% após a secagem (DONATO et al., 2015b), foi possível calcular a quantidade de FCV requerida para a produção do briquete. O valor do briquete seco foi empregado no ajuste do consumo específico de energia para esta unidade de processo. A Figura 18 mostra o inventário do descarregamento e peneiramento do carvão vegetal.

Figura 18 — Inventário do descarregamento e peneiramento do carvão vegetal



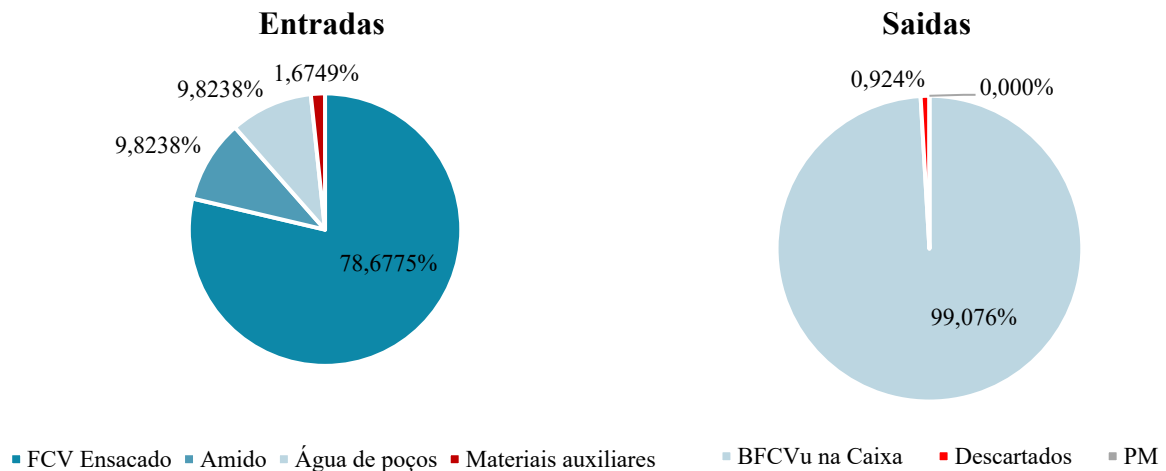
Eletricidade: 0,0041 kWh/UF

Fonte: Autoria própria

3.2.2.4 Inventário da briquetagem

Este inventário foi elaborado a partir de dados obtidos diretamente com a empresa produtora analisada. A matriz de briquetagem possui uma câmara de alimentação manual dos finos (80%) e do amido de milho (10%). Em fase sucessiva, estes produtos são misturados em uma câmara cilíndrica com dispositivo de alimentação de água (10%). A mistura é feita de maneira mecanizada. Após isso, a mistura passa para a câmara de compressão, onde é prensada na extrusora, a fim de obter-se a plasticidade, consistência e formato cilíndrico do briquete com furo central. O inventário da briquetagem encontra-se ilustrado na Figura 19.

Figura 19 — Inventário da briquetagem



Eletricidade: 0,0042 kWh/UF

Fonte: Autoria própria

3.2.2.5 Inventário da secagem

Os briquetes extrudados úmidos são submetidos ao processo de secagem, com o intuito de diminuir o teor de umidade. Nesta etapa, é utilizada uma estufa com injeção de ar quente em contracorrente através de nove ventiladores (2 CV) e um exaustor (7,5 CV), sendo o tempo de secagem de 36 horas a uma temperatura de 75°C. O combustível é o cavaco de madeira de pinus, sendo tratado e referenciado para atingir a UF.

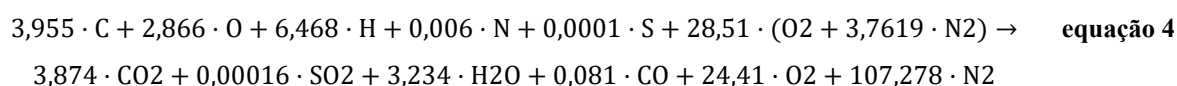
Os cálculos das emissões, considerando a queima completa do cavaco de pinus, foram feitos por meio de estequiometria do ar necessário para a queima, considerando a combustão completa do combustível (Ver Apêndice B). Foram considerados os teores do oxigênio (O₂) e do CO na saída da chaminé, com valores de 18% e 0,0005971%, respectivamente (SENGER, 2015). Dada a análise elementar em termos de C, H, O, S, N (Tabela 5), foi possível calcular o requisito de ar, a quantidade e composição dos produtos de combustão.

Tabela 5 — Análises elementar do Pinus (wt %)

Elemento	Símbolo	(wt%)	PM (kg/kmol)	Kmol
Carbono	C	47,51	12,0110	3,95554
Oxigênio	O	45,87	15,9994	2,86698
Hidrogênio	H	6,52	1,0079	6,46890
Nitrogênio	N	0,10	14,0067	0,00678
Enxofre	S	0,01	32,0600	0,00016

Fonte: Adaptado de Nwokolo; Mamphweli; Makaka (2017)

Na base molar, a equação estequiométrica da combustão do cavaco de pinus, incluído o coeficiente de excesso de ar (ΦX), está definida pela equação 4.



Com os valores das quantidades de cada substância (em mol) e suas respectivas massas molares, é possível calcular a massa de cada uma delas e suas respectivas porcentagens. É importante ter em consideração o fluxo de referência de 0,0415 kg de BFCV. Com isso, é factível definir a quantidade de cavaco de madeira de pinus requerida. No caso em estudo, são requeridos 3.000 kg de cavaco de madeira de pinus para a produção de 18.000 kg de briquete seco, num ciclo de secagem de 36h. Portanto, o total de pinus para atender o fluxo de referência é de 0,007 kg, valor para o qual são calculadas as emissões.

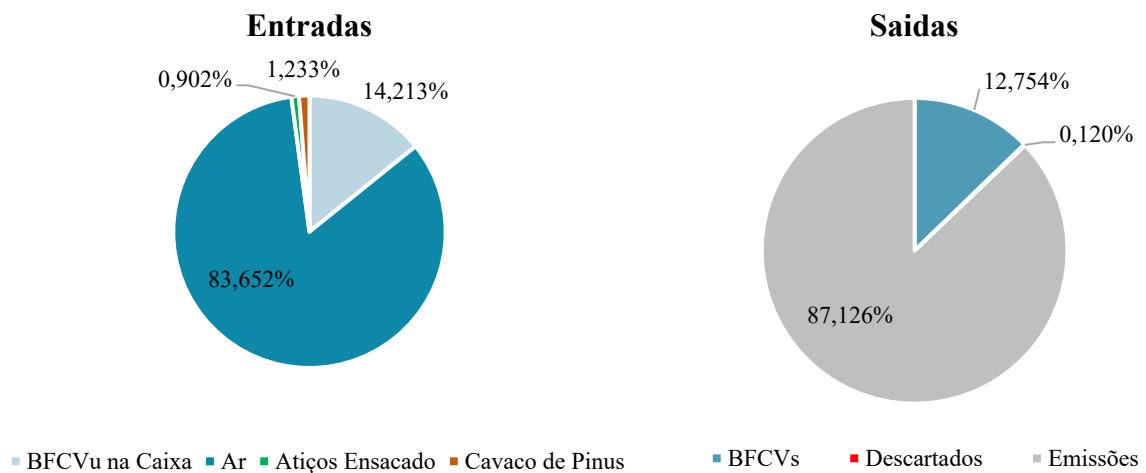
Tabela 6 — Cálculo estequiométrico do ar necessário para a queima do combustível

Sustância	kmol	PM (kg/kmol)	kg	Porcentagem dos gases úmidos (%)	Emissão para 0,007 kg de Cavaco
CO ₂	3,8745	44,0098	170,5177	4,2442%	0,0119
SO ₂	0,0001	64,0588	0,0102	0,0002%	0,0000
H ₂ O	3,2344	18,01520	58,2692	1,4503%	0,0040
CO	0,0810	28,0104	2,2688	0,0564%	0,0001
O ₂	24,4172	31,9988	781,3223	19,4473%	0,0546
N ₂	107,2783	28,0134	3005,2324	74,8012%	0,2103

Fonte: Autoria própria

Finalmente, no que diz respeito à queima do cavaco, assume-se que está totalmente queimado como CO₂, restando somente as cinzas. Por outro lado, os teores de nitrogênio e enxofre dos combustíveis são queimados em SO₂ e NO_x, respectivamente. O inventário da secagem do BFCV encontra-se ilustrado na Figura 20.

Figura 20 — Inventário da secagem



Eletricidade: 0,002 kWh/UF

Fonte: Autoria própria

3.2.3 Qualidade dos dados

Os critérios para análise da qualidade dos dados utilizados nesta pesquisa foram baseados na Matriz Pedigree de Weidema e Wesnaes (1996). Nesta matriz, os critérios para avaliação da qualidade recebem uma pontuação de relevância entre 1 e 5, sendo que 5 representa o pior grau de qualidade, conforme demonstrado na Tabela 7.

Tabela 7 — Matriz Pedigree para avaliação da qualidade dos dados obtidos

Critério ^a	Pontuação do Indicador				
	1	2	3	4	5
Confiança na fonte	Dados verificados baseados em medições	Dados verificados parcialmente e baseados em estimativas ou dados não verificados, mas baseados em medições	Dados não verificados parcialmente baseados em hipóteses	Estimativa verificadas ou estimativas qualificada (realizada por perito industrial)	Estimativa dos dados não qualificados e não verificados
Completeza	Dados representativos de um número suficiente de empresas durante um período que permita eliminar flutuações	Dados representativos de um pequeno número de empresas, mas para os períodos adequados	Dados representativos de um número adequado de empresas, mas para períodos pequenos	Dados representativos de apenas um local representativo para o aspecto considerado ou alguns locais com períodos curtos	Representatividade desconhecida, ou dados incompletos de um pequeno número de empresas e/ou de reduzidos períodos
Temporal	Menos de 3 anos de diferença para o ano do estudo	Menos de 6 anos de diferença	Menos de 10 anos de diferença	Menos de 15 anos de diferença	Idade do dado desconhecida ou mais de 15 anos de diferença
Regional	Dados provenientes da área em estudo	Dados médios respeitantes a uma área maior do que a área em estudo, mas que a engloba	Dados de uma área com condições de produção semelhantes	Dados de uma área com condições de produção com algumas semelhanças	Dados de área desconhecida ou área com muita diferença nas condições de produção
Tecnologia	Dados da empresa em estudo	Dados relativos aos mesmos processos / materiais, mas de outra empresa	Dados de processos ou materiais relacionados mas com mesma tecnologia, ou dados de processos e materiais em estudo mas de diferente tecnologia	Dado de processos ou materiais em estudo mas tecnologias diferentes, ou dados em processos em escala laboratorial de mesma tecnologia	Dados de processos ou materiais relacionados, mas em escalala laboratorial de diferente tecnologia

Fonte: Adaptado (tradução livre) de Weidema e Wesnæs (1996)

Após assinalar uma pontuação para cada indicador, atribui-se um fator de incerteza relativo à qualidade dos dados para cada um dos fluxos elementares dos processos em subestudo, baseando-se nos dados da Tabela 8.

Tabela 8 — Fatores de incerteza aplicados à pontuação da Matriz Pedigree

Critério	Pontuação do Indicador				
	1	2	3	4	5
Confiança na fonte	1,00	1,05	1,01	1,20	1,50
Completeza	1,00	1,02	1,05	1,10	1,20
Temporal	1,00	1,03	1,01	1,20	1,50
Regional	1,00	1,01	1,02	---	1,10
Tecnologia	1,00	---	1,20	1,50	2,00

Fonte: Althaus et al. (2007)

A composição da pontuação atribuída à qualidade dos dados coletados na empresa e os índices de incerteza são apresentados na Tabela 9, para a produção de CV e na Tabela 10 para os BCV.

Tabela 9 — Análise da qualidade dos dados via Matriz Pedigree para a produção de CV

Critério	Informação desejada	Observação/justificativa	Pontuação atribuída	Fator
Confiança na fonte	Dados verificados baseados em medições.	Coleta in loco e complementado com o trabalho de Miranda Santos et al. (2017).	2	1,02
Completeza	Dados representativos de um número suficiente de empresas durante um período que permita eliminar flutuações.	Dados advindos de uma UPC, localizada no Estado do Paraná. Os dados representam a tecnologia com uma participação de 70% do setor.	4	1,10
Temporal	2020	Dados de 2017.	1	1,00
Regional	Sudeste e Sul do Brasil	Informações obtidas de uma UPC do Estado de Paraná.	1	1,00
Tecnologia	Sistema forno circular de alvenaria	Sistema forno circular de alvenaria sem aproveitamento dos gases da pirólise.	1	1,00

Fonte: Adaptado de Weidema e Wesnæs (1996)

Tabela 10 — Análise da qualidade dos dados via Matriz Pedigree para a produção de BFC

Critério	Informação desejada	Observação/justificativa	Pontuação atribuída	Fator
Confiança na fonte	Dados verificados baseados em medições.	Coleta in loco numa UP, localizada no Estado do Paraná. Verificação feita por meio de balanço de massa.	1	1,00
Completeza	Dados representativos de um número suficiente de empresas durante um período que permita eliminar flutuações.	Dados advindos de uma UP de briquetes feitos de finos de carvão vegetal, por meio da briquetagem. Por falta de dados, é difícil quantificar a representatividade dessa tecnologia nos processos de densificação de biomassa.	4	1,10
Temporal	2020	Dados de 2020	1	1,00
Regional	Sudeste e Sul do Brasil	Informações obtidas de uma UP localizada em Ponta Grossa, PR.	1	1,00
Tecnologia	Briquetagem	Sistema de compactação por meio de extrusora.	1	1,00

Fonte: Adaptado de Weidema e Wesnæs (1996)

Após pontuar cada um dos critérios, é possível calcular o grau de incerteza para o aspecto ambiental global dos conjuntos de dados avaliados com intervalo de 95% (σ_g^2), conforme a equação 5.

$$\sigma_g^2 = e^{\sqrt{\sum_{i=1}^6 [\ln U_i]^2 + [\ln U_b]^2}} \quad \text{(equação 5)}$$

Onde: σ_g^2 = Grau de incerteza com intervalo de 95%; U_i = fator de incerteza do indicador i ; U_b = fator de incerteza básico aplicado para o presente caso de emissões de processos, para demanda de energia elétrica, produtos acabados e serviços de tratamento de resíduos = 1,05 (ALTHAUS et al., 2007).

Desta forma, os valores de grau de incerteza obtidos para a produção de CV e para a fabricação dos BCV, são 1,13 e 1,10, respectivamente. Diante disso, pode-se afirmar que para os casos avaliados considera-se um valor de 13% e 10% de incerteza para o aspecto ambiental global avaliado para o processo da produção de CV e para a fabricação dos BCV, respectivamente.

3.3 ETAPA 3: AVALIAÇÃO DO IMPACTO DO CICLO DE VIDA

Para a avaliação dos impactos, utilizou-se os dados inventariados na etapa 2 e estes foram lançados no software OpenLCA, banco de dados ecoinvent 3.5. Esta seção é subdividida em duas, a primeira envolve categorias e métodos de avaliação de impacto do ciclo de vida, seguida pela análise de sensibilidade.

3.3.1 Categorias e métodos de Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida

Esta análise baseou-se nas recomendações da Rede de Pesquisa em Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (RAICV) para a escolha dos modelos contextualizados na realidade do Brasil (RAICV, 2019), além das recomendações de caráter internacional como

UNEP/SETAC (V1 e V2) (FRISCHKNECHT; JOLLIET, 2016, 2019) e ILCD (JRC, 2011). Foram selecionadas 13 categorias de impacto *midpoint*, conforme apresentado na Tabela 11.

Tabela 11 — Categoria de impacto, modelos de caracterização e métodos contextualizados à realidade do Brasil

Categorias de impacto (abreviatura; un.)	Modelo ou Referência	Disponível em	Recomendado por:
Mudanças climáticas (GWP ; kg CO ₂ eq 100a)	(IPCC, 2013) (JOOS et al., 2013)	ReCiPe midpoint (I)	UNEP/SETAC (2016)
Depleção de ozônio (OD ; kg CFC-11 eq),	(WMO, 2011) (HAYASHI et al., 2006) (DE SCHRYVER et al., 2011)	ReCiPe midpoint (I)	ILCD (JRC, 2011)
Formação de oxidantes fotoquímicos (POF ; kg NMVOC eq)	(VAN ZELM et al., 2016)	ReCiPe midpoint (I)	ILCD (JRC, 2011)
Material particulado (PMF ; kg PM-2.5eq)	(VAN ZELM et al., 2016)	ReCiPe midpoint (I)	---
Acidificação terrestre (TA ; kg SO ₂ eq)	(AZEVEDO et al., 2013a)	ReCiPe midpoint (I)	RAICV (2017)
Depleção de Recursos Abióticos (ADP , kg Sb-eq)	(GUINÉE; HEIJUNGS, 1995)	CML	UNEP/SETAC (2017); RAICV (2017)
Escassez hídrica (EH ; m ³ eq /m ³)	(BOULAY et al., 2018)	AWARE	RAICV (2017)
Eutrofização aquática de água doce (FE ; kg P eq),	(AZEVEDO et al., 2013b)	ReCiPe midpoint (I)	UNEP/SETAC (2017); RAICV (2017)
Eutrofização aquática marinha (ME ; kg N eq)	(COSME; HAUSCHILD, 2016)	ReCiPe midpoint (I)	UNEP/SETAC (2017); RAICV (2017)
Ecotoxicidade terrestre (TEF ; kg 1-4 DB eq),	USEtox model (ROSENBAUM et al., 2008)	ReCiPe midpoint (I)	UNEP/SETAC (2017);
Ecotoxicidade aquática de água doce (FET ; kg 1-4 DB eq)	USEtox model (ROSENBAUM et al., 2008)	ReCiPe midpoint (I)	UNEP/SETAC (2017); ILCD (JRC, 2011)
Ecotoxicidade aquática marinha (MET ; kg 1-4 DB eq)	USEtox model (ROSENBAUM et al., 2008)	ReCiPe midpoint (I)	UNEP/SETAC (2017); ILCD (JRC, 2011)
Toxicidade humana carcinogênica (HTPc ; kg 1-4 DB eq)	USEtox model (ROSENBAUM et al., 2008)	ReCiPe midpoint (I)	UNEP/SETAC (2017); ILCD (JRC, 2011)
Toxicidade humana não carcinogênica (HTPnc ; kg 1-4 DB eq)	USEtox model (ROSENBAUM et al., 2008)	ReCiPe midpoint (I)	UNEP/SETAC (2017); ILCD (JRC, 2011)

Fonte: Autoria própria

3.4 ETAPA 4: INTERPRETAÇÃO

Com base nas informações geradas nas etapas anteriores, os resultados foram sumarizados e analisados para identificar as questões significativas com base na definição do objetivo e escopo. Esta fase de interpretação também incluiu análise de sensibilidade para descobrir a relação ótima com o impacto mais baixo.

3.4.1 Análise de sensibilidade

Optou-se por utilizar a técnica de cenários para realizar a análise de sensibilidade da produção dos BFCV: (i) Cenário base, (ii) Cenário 1 — UPB próxima à carvoaria com o aproveitamento dos gases para a secagem dos BFCV, (iii) Cenário 2 — UPB próxima à carvoaria, com o aproveitamento dos gases para secagem dos BFCV e instalação de painéis solares fotovoltaicos visando a geração de energia, e (iv) Cenário 3 — Produção dos briquetes conforme cenário base, sem produção de CV e os FCV advindos como produtos (Sem o impacto da produção do CV, impacto neutro). Na sequência, foram calculados os resultados dos cenários e comparados com o cenário base. Maior detalhamento acerca dos cenários definidos são apresentados no capítulo 4.

3.4.1.1 *Cenário base*

O cenário foi desenvolvido considerando as informações na seção 3.1.4.

3.4.1.2 *Cenário 1 — UPB próxima a carvoaria com o aproveitamento dos gases para a secagem dos BFCV*

O cenário foi realizado considerando as instalações da UPB localizadas na carvoaria, pelo qual o transporte do carvão vegetal é desconsiderado. Por outra parte, o processo de

secagem dos briquetes são feitos dentro de um forno, utilizando os gases combustos do queimador. Foi necessário o cálculo do calor necessário para remover a umidade do BFCVu, além do cálculo do calor liberado na queima dos gases da carbonização, por meio das equações fundamentais da calorimetria (Ver apêndice E).

3.4.1.3 Cenário 2 — UPB próxima a carvoaria, com o aproveitamento dos gases e instalação de painéis solares fotovoltaicos visando a geração de energia

O cenário foi representado considerando as instalações da UPB localizadas na carvoaria, pelo qual o transporte do carvão vegetal é desconsiderado. Os gases combustos do queimador são usados para geração de energia, complementado com energia solar fotovoltaica, gerada diretamente por placas solares instaladas na carvoaria, com o intuito de serem usadas nos diferentes estágios onde for necessária a energia elétrica. Foi necessário o cálculo do dimensionamento do sistema solar fotovoltaico (ver Apêndice F), para identificar a viabilidade técnica desta implementação. Foi usado o fluxo “*electricity production, photovoltaic, 3kWp slanted-roof installation, multi-Si, panel, mounted, label-certified | electricity, low voltage, label-certified | Cutoff, U – CH*” disponível no banco de dados ecoinvent 3.5. O consumo de eletricidade foi tratado e referenciado para atingir a UF.

3.4.1.4 Cenário 3 — Produção dos briquetes conforme cenário base, sem produção de CV e os FCV advindos como produto.

O cenário foi desenvolvido considerando as informações na seção 3.1.4., porém excluindo a produção do CV, com o intuito de desconsiderar o impacto advindo desse processo. Dessa forma, os FCV entram no ciclo produtivo como um produto.

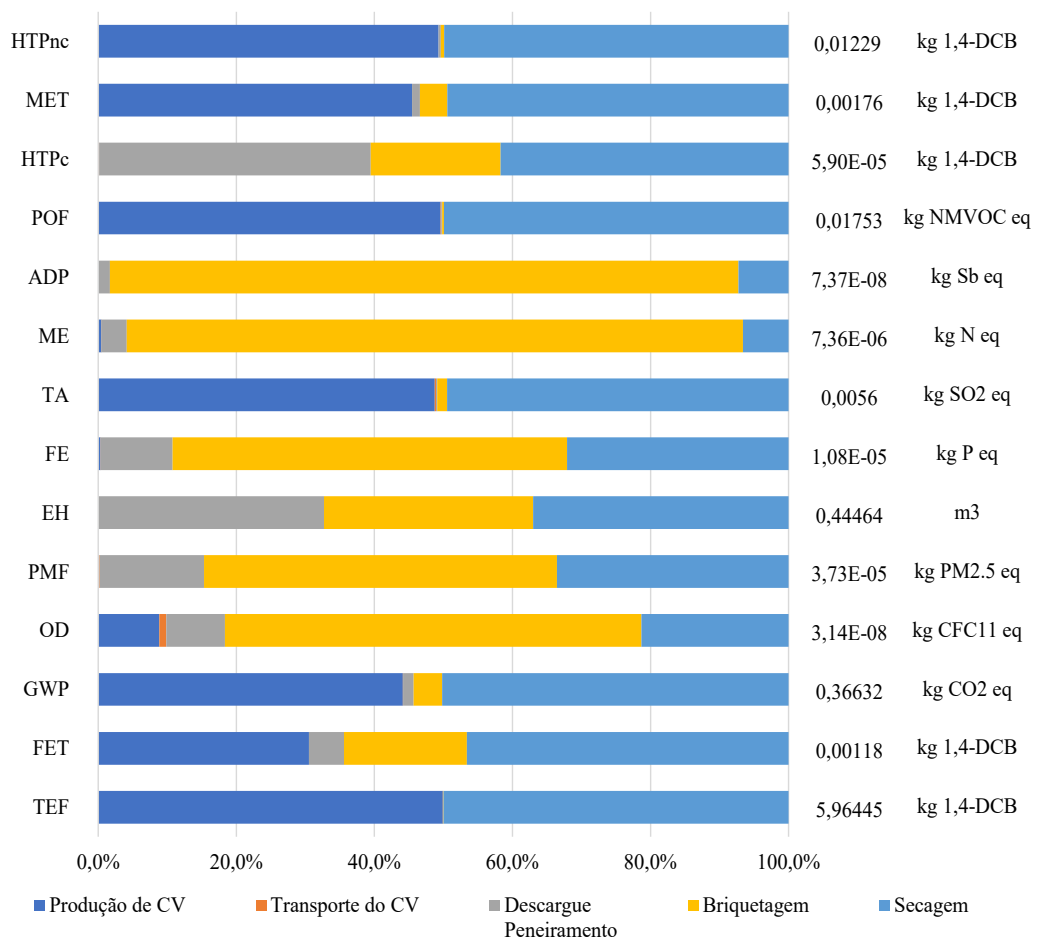
4 RESULTADOS

São apresentados os resultados da ACV iniciando pela ACV do processo base, dando sequência na análise de sensibilidade e concluindo com as comparações referentes a produção de carvão vegetal e a produção dos briquetes de finos de carvão vegetal.

4.1 RESULTADOS DA ACV PARA O CENÁRIO BASE

Os resultados do impacto ambiental são apresentados no gráfico da Figura 21, com as contribuições de cada processo e dos fluxos intermediários.

Figura 21 — Contribuição de cada processo na ACV para os BFCV



Fonte: Autoria própria

O processo da secagem na produção dos briquetes de finos de carvão vegetal dominou a maioria das categorias de impacto, exceto para depleção de ozônio, material particulado, escassez hídrica, eutrofização aquática de água doce e eutrofização aquática marinha, que foram dominadas pelo processo de briquetagem e processo de produção de carvão.

As Mudanças Climáticas (GWP) da produção do BFCV são da ordem de 0,36 kg de CO₂ eq/UF. A fase de secagem foi responsável por 50,18% desse impacto como consequência da queima do cavaco, onde são emitidos gases de efeito estufa, embora essa emissão são emissões compensadas, resultando em um efeito nulo sobre o aquecimento global, pois os cavacos advêm do *pinus* que captura carbono existente na atmosfera durante o processo de fotossíntese, transformando o CO₂ em energia necessária para sua sobrevivência. Outro aspecto que soma nessa contribuição é a demanda de eletricidade de alta tensão usada na estufa com injeção de ar quente em contracorrente. Observa-se que a eletricidade advinda das hidrelétricas possui um grau de contribuição com a emissão de CH₄ e CO₂, devido ao arraste dos sedimentos pelo rio para os reservatórios que aumentam a matéria orgânica que, com o tempo, termina decompondo e gerando a formação desses gases, como foi evidenciado no estudo de Faria et al. (2015). Os autores avaliaram as emissões de GEE em reservatórios de florestas tropicais no Brasil, confirmando esse impacto. Além disso, destacam que um dos principais problemas da energia hidrelétrica é a falta de um método para estimar as emissões futuras de GEE. O processo da produção de CV foi responsável por 44,12% do total do impacto do potencial de aquecimento global, como resultado da emissão de CH₄ e CO₂, pois os gases da carbonização são liberados na atmosfera sem serem queimados previamente. Não obstante, essa emissão é considerada neutra pelas plantações de eucalipto que podem compensar as emissões de gases com efeito estufa (GEE). Enquanto os processos de briquetagem, descarregamento, peneiramento e transporte do CV tiveram contribuições de 4,12, 1,52 e 0,04% do total, respectivamente.

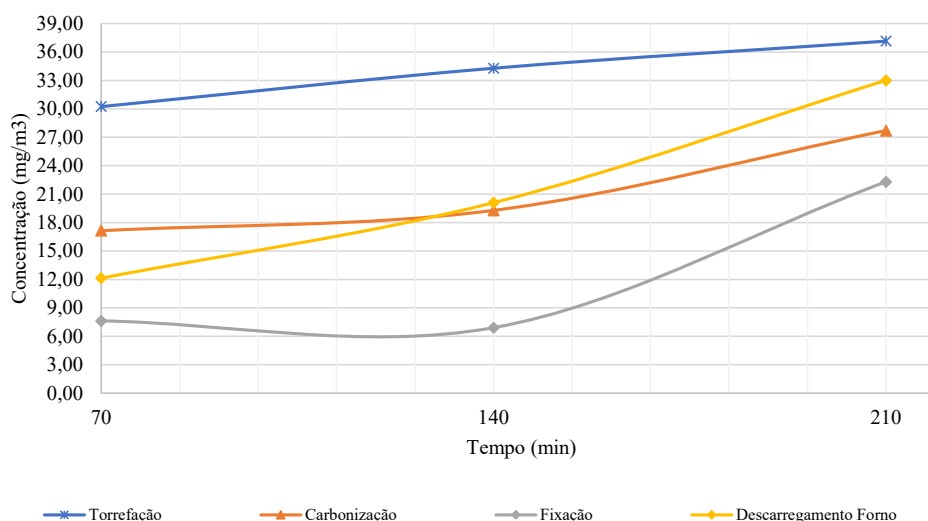
A Depleção de Ozônio (OD) da produção do BFCV é de 3,14E-08 kg CFC₁₁ eq/UF. Os processos de briquetagem e secagem foram responsáveis por mais de 80% do impacto nessa categoria, sendo de 60,34 e 21,32%, respectivamente. Esse impacto advêm da emissão de óxido nitroso (N₂O), que é formado durante os processos de degradação microbiológica, resultado da utilização de fertilizantes nitrogenados no crescimento do pé de milho dos milharais, que fornecem a matéria-prima necessária a produção do amido, usado como aglutinante, no caso da briquetagem e do *Pinus* no caso do cavaco. Na opinião de Portmann et al. (2012), a emissão de N₂O tem um efeito significativo, pois está envolvido em ciclos catalíticos e continuamente

reagem e se reformam. Enquanto os processos de produção de CV, transporte do CV, descarregamento e peneiramento tiveram uma contribuição de 8,85, 1,01 e 8,48%, na devida ordem.

A Formação de Oxidantes Fotoquímicos (POF) teve um valor de 0,017 kg NMVOC eq /UF. Ao analisar o gráfico da Figura 21, pode-se notar que a contribuição da produção do CV e secagem foi de mais de 80% do impacto nessa categoria, sendo de 49,57 e 49,91% respectivamente. Nos dois processos é feita queima de biocombustível de madeira (toras/cavaco) em que podem ser liberados, conforme o caso, NO_x , SO_2 , CO , CH_3OH , H_3CCOOH . Esses compostos favorecem a formação do ozônio fotoquímico (O_3), por meio da reação desses poluentes com hidrocarbonetos presentes na atmosfera e radiação solar, sendo prejudicial para a vegetação e o material, e também para os humanos, em altas concentrações (KYLILI; CHRISTOFOROU; FOKAIDES, 2016).

O Material Particulado (PMF) para a produção dos BFCV foi de 3,80E-04kg $\text{PM}_{2.5}$ eq/UF. O processo de secagem representou 50% e a produção de CV 44,74% da contribuição nessa categoria. Em relação à produção do carvão, evidenciou-se concentrações significativas de material particulado durante o processo de carbonização da madeira.

Figura 22 — Concentrações médias de MP em função do tempo, referentes a cada fase da carbonização



Fonte: Autoria própria

Do gráfico da Figura 22 pode-se observar que a fase com maior material particulado na produção de carvão vegetal foi a torrefação, com uma concentração média de $37,14 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, o que foi 1.3, 3.1 e 1.1 vezes maior do que as fases de carbonização, fixação e descarregamento, respectivamente. Isto faz sentido considerando que na etapa da torrefação é onde é feita a liberação de um grupo de substâncias voláteis, ou seja, são liberados gases condensáveis e não condensáveis (NOGUEIRA, 2003). Similarmente na secagem do BFCV, o impacto deste processo advém da queima do cavaco de madeira para gerar calor, quando é emitido material particulado fino, afetando negativamente a qualidade do ar e a saúde. O processo de descarregamento, peneiramento e briquetagem tiveram um resultado de 2,63% para ambos.

Em relação à Acidificação Terrestre (TA) para a produção dos BFCV obteve-se como resultado $5,6\text{E}-03 \text{ kg SO}_2 \text{ eq/UF}$, onde o processo de secagem representou 49,46% e a produção de CV 48,75% da contribuição nessa categoria. NO_2 e SO_2 são os principais contribuintes, pelo fato de serem emitidos durante a queima do biocombustível de madeira. A emissão de NO que é oxidado a NO_2 , pode aumentar, sobretudo com temperatura de combustão altas que favorecem a emissão de NO. Essas substâncias acidificantes podem afetar negativamente o ecossistema terrestre pela redução do pH do solo (GADE; HAUSCHILD; LAURENT, 2021) em consequência, a emissão dos gases na atmosfera pode trazer um impacto significativo. Já os processos de transporte do CV, descarregamento, peneiramento e briquetagem contribuem apenas ligeiramente, com menos de 2% do total.

No que se refere à Escassez Hídrica (EH) a produção do BFCV teve um impacto de $0,444 \text{ m}^3/\text{UF}$. O descarregamento/peneiramento, briquetagem e secagem tiveram uma contribuição de 32,65, 30,30 e 37,00%, respectivamente. Nesses processos o uso de eletricidade advinda das hidrelétricas é a fonte de impacto, afetando possivelmente no abastecimento de água para a população e uso em outras atividades econômicas tais como: o turismo, a piscicultura, a agricultura, entre outras (GALVÃO; BERMAN, 2015).

Para a categoria de impacto ambiental de Depleção de Recursos Abióticos (ADP) houve um impacto de $7,37\text{E}-08 \text{ kg Sb-eq/UF}$. Observou-se que a briquetagem foi o principal responsável pelo impacto desta categoria, com uma contribuição de 91,08%. O resultado está relacionado ao consumo de energia dessa atividade. O processo de secagem, descarregamento e peneiramento, tiveram um impacto na categoria de ADP de 7,25 e 1,67%, respectivamente.

A Eutrofização Aquática de Água Doce (FE) teve um impacto de $1,08E-05$ kg P eq/UF. Nesta categoria, os processos que mais contribuíram foram a briquetagem e a secagem, com uma porcentagem de 57,14 e 32,09%. Para ambos, a geração de energia elétrica foi, mais uma vez, a principal responsável pelo impacto desta categoria, como consequência do acúmulo de carga de nutrientes arrastados até os reservatórios, que podem acarretar na proliferação excessiva de algas, cuja decomposição favorece a produção de metano (ALMEIDA et al., 2016). O descarregamento e peneiramento também tiveram uma contribuição considerável (10,45%).

A Eutrofização Aquática Marinha (ME) teve um impacto de $7,36E-06$ kg N eq/UF. A briquetagem contribuiu com 89,28% nesta categoria. O uso de amido de milho foi o principal responsável, decorrente do possível uso de fertilizantes nitrogenados, onde dominam as fontes difusas de fósforo e nitrogênio. A secagem, o descarregamento e o peneiramento tiveram uma contribuição de 6,60% e 3,68%, respectivamente.

A Ecotoxicidade Terrestre (TEF), Ecotoxicidade Aquática de Água Doce (FET) e Ecotoxicidade Aquática Marinha (MET) tiveram um impacto de 5,964, $1,18E-03$ e $1,76E-03$ kg 1-4 DB eq/UF, respectivamente. Os resultados mostraram que os processos de produção de carvão vegetal e secagem foram os mais efetivos para o potencial de ecotoxicidade. Esses processos somam mais de 77% da contribuição total de cada uma das categorias de impacto de potencial de ecotoxicidade, como consequência do uso de madeira de floresta plantada na produção de carvão vegetal, além do uso de cavaco de pinus na secagem dos BFCV. O maior destaque dos impactos provém da etapa de manutenção nos plantios, principalmente pela aplicação de herbicida, que foi o maior contribuidor para a ecotoxicidade. Esse resultado é consonante com o estudo de Barrantes (2016), onde concluiu que *hotspots* são a produção de mudas na cultura de madeira de floresta plantada, com uma contribuição de 83% de todo o potencial deste impacto, devido à aplicação de glifosato, além do consumo de ácido nítrico e amônia no processo.

A Toxicidade Humana não Carcinogênica (HTPnc) apresentou o impacto de 0,01 1-4 DB eq/UF. O processo de produção de carvão vegetal e a secagem dos briquetes contribuíram significativamente, acima de 99%, como resultado da combustão da madeira de eucalipto e do cavaco. No caso da Toxicidade Humana Carcinogênica (HTPc) o impacto foi de $5,90E-05$ 1-4 DB eq/UF, sendo o principal responsável o processo de secagem (41,71%). Para ambas as categorias, o efeito da combustão de cavaco e também da madeira de eucalipto, muito embora

de floresta plantada, contribuíram para o aumento do potencial de toxicidade humana, devido às liberações de algumas substâncias, tais como: metais pesados (arsênio, níquel, cromo, mercúrio, cádmio e chumbo), formaldeídos, dioxinas, benzeno, hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (PAH), compostos orgânicos voláteis não-metânicos – (NMVOCs), dentre outros compostos, acarretando efeitos deletérios à saúde (ARBEX et al., 2004; MIRANDA SANTOS et al., 2017; PIEROBON et al., 2015).

4.2 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

Nesta seção foi conduzida uma análise de sensibilidade com o intuito de verificar o impacto de alguns processos-chave destacados na ACV do cenário base. Visando uma redução dos impactos, por meio de formas mais limpas e eficientes, foram propostos três cenários alternativos. Os valores absolutos da avaliação para cada categoria de impacto para os cenários encontram-se na Tabela 12.

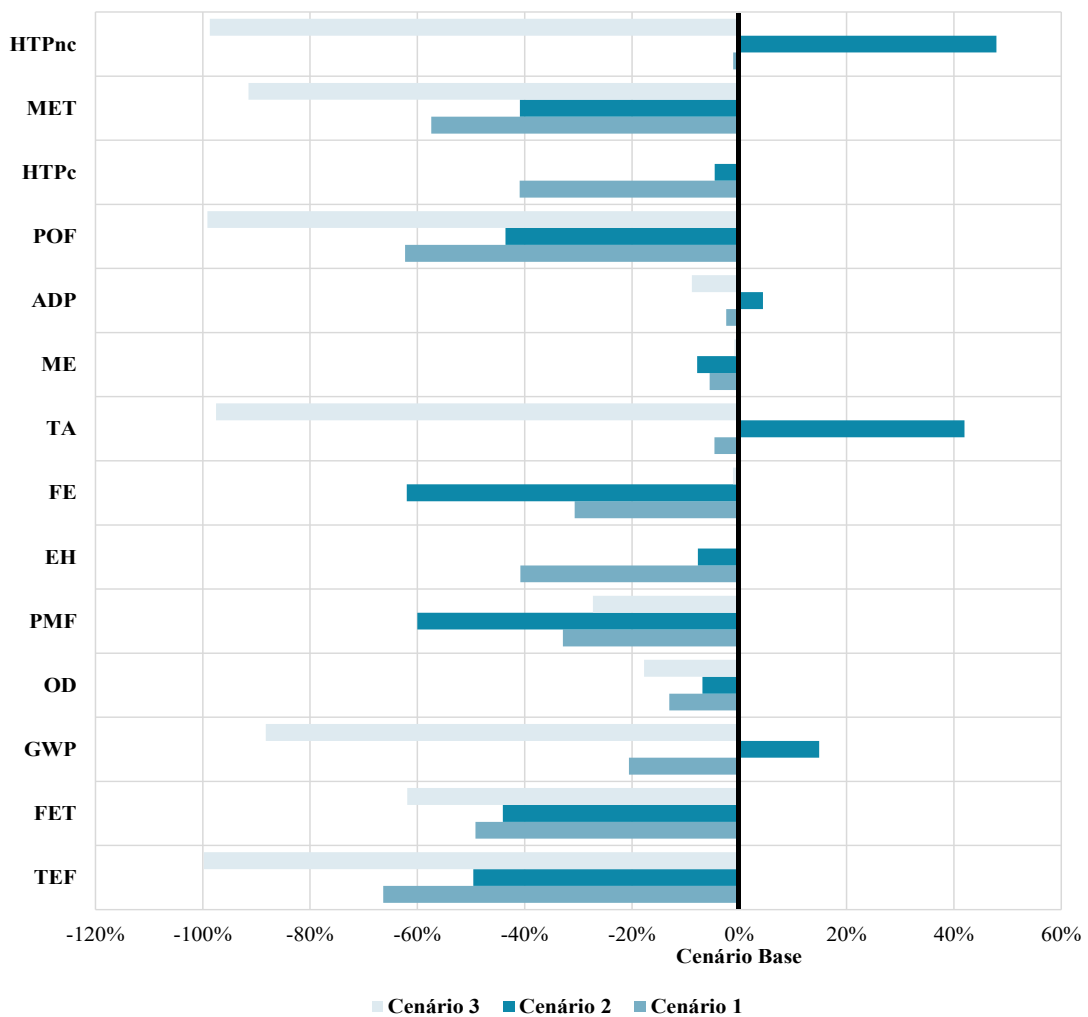
Tabela 12 — Resultado da avaliação de impacto de cada uns dos cenários para a produção dos BFCV

Descrição	Unidade	Impacto			
		Cenário Base	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
Ecotoxicidade terrestre	kg 1,4-DCB	5,96445	2,00645	3,00697	0,01214
Ecotoxicidade aquática de água doce	kg 1,4-DCB	0,00118	0,0006	0,00066	0,00045
Mudanças climáticas	kg CO ² eq	0,36632	0,29093	0,27524	0,04301
Depleção de ozônio	kg CFC11 eq	3,14E-08	2,73E-08	2,93E-08	2,58E-08
Material particulado	kg PM2.5 eq	3,73E-05	2,50E-05	1,49E-05	2,71E-05
Escassez hídrica	m ³	0,44464	0,2633	0,41035	0,44398
Eutrofização aquática de água doce	kg P eq	1,08E-05	7,46E-06	4,09E-06	1,06E-05
Acidificação terrestre	kg SO ² eq	0,0056	0,00534	0,00795	0,00014
Eutrofização aquática marinha	kg N eq	7,36E-06	6,95E-06	6,79E-06	7,30E-06
Depleção de Recursos Abióticos	kg Sb eq	7,37E-08	7,20E-08	7,70E-08	6,72E-08
Formação de oxidantes fotoquímicos	kg NMVOC eq	0,02488	0,00938	0,01265	3,90427E-06
Toxicidade humana carcinogênica	kg 1,4-DCB	5,90E-05	3,48E-05	5,63E-05	5,89E-05
Ecotoxicidade aquática marinha	kg 1,4-DCB	0,00176	0,00075	0,00104	0,00015
Toxicidade humana não carcinogênica	kg 1,4-DCB	0,01229	0,01215	0,01818	0,00016

Fonte: Autoria própria

A partir dos resultados, observou-se que na produção dos BFCV o processo de produção de carvão vegetal, briquetagem e secagem tiveram uma contribuição significativa, dependendo da categoria, no qual a queima de biomassa e o consumo de eletricidade foram os principais responsáveis. Mesmo sendo fontes renováveis e com impactos menores, quando comparados com fontes de energia com origem nos combustíveis fósseis, geram também impacto ambiental significativos, sobretudo quando não são avaliados os impactos a longo prazo (FARIA et al., 2015). Os cenários tiveram comportamentos diferentes na contribuição para os impactos, com tendência de queda em quase todas as categorias. No entanto o cenário 3 apresentou um aumento para HTPnc, ADP e TA, como mostrado na Figura 23.

Figura 23 — Resultados de ACV dos cenários em relação ao cenário base



Fonte: Autoria própria

Os resultados da análise de sensibilidade sugerem que a UPB próxima à carvoaria, com o aproveitamento dos gases para a secagem dos BFCV, pode favorecer com a redução de mais de 57% para ecotoxicidade terrestre, formação de oxidantes fotoquímicos e ecotoxicidade aquática marinha; mais de 40% para ecotoxicidade aquática de água doce, escassez hídrica e toxicidade humana carcinogênica; mais de 31% para material particulado e eutrofização aquática de água doce; 21% para mudanças climáticas. Categorias como depleção de ozônio, acidificação terrestre, eutrofização aquática marinha, depleção de recursos abióticos e toxicidade humana, apresentaram redução mais baixa. Portanto, realizar a secagem do BFCV utilizando os gases combustos do queimador pode trazer um ganho ambiental significativo, pelo aproveitamento do potencial térmico dos gases da carbonização (CARDOSO, 2010), de modo a otimizar o ciclo produtivo, pois no cenário base são liberados para a atmosfera. O fato de eliminar o uso de eletricidade necessária para a estufa com injeção de ar quente em contracorrente, usada no cenário base, também pode trazer, de forma expressiva a diminuição da carga ambiental. Esses resultados são semelhantes aos relatados por Cardoso (2010), mesmo não sendo um estudo de ACV, ao avaliar o impacto da queima dos gases da carbonização nas emissões GEE, quando os resultados apontaram uma redução de 96,95% de metano e 93,76% de monóxido de carbono com a queima dos gases pela fornalha. Esse fato pode explicar a redução significativa das categorias GWP e POF.

Em relação à UPB próxima à carvoaria, com o aproveitamento dos gases para secagem dos BFCV e instalação de painéis solares fotovoltaicos, obteve-se uma redução expressiva em quase todas as categorias de impacto. A Figura 23 revela uma queda de mais de 60% para material particulado e eutrofização aquática de água doce; 50% para ecotoxicidade terrestre; mais de 41% para ecotoxicidade aquática de água doce, ecotoxicidade aquática marinha e formação de oxidantes fotoquímicos. Outras categorias, tais como: depleção de ozônio, eutrofização aquática marinha e toxicidade humana carcinogênica, tiveram uma queda, muito embora, não tão destacada quanto as outras. Com base nos resultados, foi possível verificar que no cenário 2, as categorias mudanças climáticas, acidificação terrestre, depleção de recursos abióticos e toxicidade humana não carcinogênica tiveram um comportamento diferenciado, com um aumento no impacto. Esse aumento está relacionado à produção dos painéis fotovoltaicos, como consequência do consumo de eletricidade requerida na fabricação (ITO, 2011). O mercado de painéis fotovoltaicos está dominado pela China, a qual possui uma matriz energética baseada ainda em carvão mineral, sendo assim é razoável concluir que o impacto

advém da modalidade de geração de eletricidade (MUTERI et al., 2020). Esses resultados são semelhantes aos encontrados por Celik et al. (2016). Os autores destacaram que o consumo de eletricidade durante a fabricação dos painéis fotovoltaicos foi o responsável entre 50 a 90% da carga ambiental, por exemplo, o consumo de eletricidade alcançou uma contribuição de 80% para o GWP.

Os resultados, conforme Figura 23, apontam que para a produção dos briquetes conforme cenário base, sem produção de CV e os FCV advindos como produto, favorecem na queda da carga ambiental de mais de 98% para ecotoxicidade terrestre, acidificação terrestre, formação de oxidantes fotoquímicos e toxicidade humana não carcinogênica; mais de 88% para mudanças climáticas e ecotoxicidade aquática marinha; de 62% para ecotoxicidade aquática de água doce; 27% para material particulado e 18% para depleção de ozônio; ainda de uma redução baixa para as outras categorias. Pelos resultados pode-se identificar que a produção de carvão vegetal tem um impacto alto em grande parte das categorias, consequência da carga de poluentes gerada para a atmosfera. Por outro lado, o fato de introduzir os FCV como produto, faz com que ele entre no sistema sem os impactos gerados na produção do CV. O reaproveitamento do volume expressivo deste material é uma alternativa razoável pelo fato de que representa, em média 25%, da produção do CV, resultado do transporte e peneiramento. O não uso dos FCV pode acarretar a necessidade de utilização de mais madeira para atingir os volumes de produção de CV, o que pode gerar um impacto maior.

De modo geral, os cenários avaliados apresentaram uma redução expressiva da carga ambiental na produção de BFCV nas categorias, à medida que são retirados os processos dependentes da eletricidade e a queima de biomassa, uns dos *hotspots* mais significativos.

O aproveitamento dos gases combustos para a secagem dos BFCV predominou como a prática que mais contribuiu para minimizar impactos ambientais. Esse resultado também foi apontado por Cardoso (2010), porém para secagem de madeira. Ainda, Siqueira (2021), em estudo para propor alternativa de aproveitamento dos gases da carbonização, reduzindo as emissões e gerando energia (elétrica e/ou térmica). Tal estudo objetivou a secagem artificial da madeira dentro do próprio forno. Conforme observado na presente pesquisa, a secagem artificial dos BFCV possibilitaria um menor impacto ambiental, em consonância com os estudos citados.

5 CONCLUSÕES

Mesmo o carvão vegetal sendo parte importante da matriz energética brasileira, ainda faltam implementações em larga escala dos avanços na parte tecnológica, voltados à melhoria de rendimentos e sustentabilidade.

O expressivo volume de finos de carvão vegetal tem sido um grande gargalo econômico e ambiental dentro na produção de carvão vegetal, daí a necessidade do seu aproveitamento por meio da briquetagem.

Mesmo com diversos estudos acerca da produção de briquetes de finos de carvão vegetal no Brasil, são poucos os que abrangem os efeitos ambientais, sendo as mudanças climáticas o foco dessas pesquisas. Este estudo demonstrou a importância de identificar as contribuições de cada fase produtiva em diferentes categorias de impacto e, conseqüentemente, detectou possíveis melhorias referentes ao desempenho ambiental do processo produtivo.

Considerando o ciclo de vida de BFCV, o processo responsável pela maior parte dos potenciais impactos ambientais foi a secagem, exceto para depleção de ozônio, material particulado, escassez hídrica, eutrofização aquática de água doce e eutrofização aquática marinha, que foram dominadas pelo processo de briquetagem.

A análise de sensibilidade mostrou que a UPB próxima à carvoaria, com o aproveitamento dos gases para a secagem dos BFCV, predominou como a prática que mais contribuiu para minimizar impactos ambientais entre os cenários avaliados, favorecendo com a redução de mais de 57% para ecotoxicidade terrestre, formação de oxidantes fotoquímicos e ecotoxicidade aquática marinha; mais de 40% para ecotoxicidade aquática de água doce, escassez hídrica e toxicidade humana carcinogênica; mais de 31% para material particulado e eutrofização aquática de água doce; e 21% para mudanças climáticas.

De modo geral, os cenários avaliados apresentaram uma redução expressiva da carga ambiental na produção de BFCV nas categorias, à medida que são retirados os processos dependentes da eletricidade e a queima de biomassa, uns dos *hotspots* mais significativos. Assim, observou-se que a energia elétrica tem uma forte influência no desempenho ambiental dos cenários avaliados. Em consequência, é válido frisar que a utilização dos gases combustos

do queimador, além do uso de fontes alternativas de energia, como a energia fotovoltaica, podem alterar positivamente os resultados da ACV.

Devido a coleta e cálculo de certas emissões em alguns processos, foi possível obter resultados mais apurados para a realidade brasileira. Com a finalidade de melhorar a robustez e qualidade do inventário, recomenda-se realizar medições *in loco* das emissões. Em relação aos GEE e material particulado em todas as etapas, bem como coletar dados de outras empresas, para avaliar a representatividade dos resultados no Brasil. Acredita-se, contudo, que os dados consolidados ao longo do estudo são considerados como uma primeira aproximação da realidade produtiva dos briquetes de FCV e poderão ser de grande utilidade para a comunidade de ACV no Brasil, dada a relevância do carvão vegetal na matriz energética nacional. Finalmente, sugere-se aos produtores de CV e BFCV avaliar a viabilidade econômica da instalação da unidade de empacotamento na carvoaria, para assim aproveitar os gases na secagem dos BFCV, garantindo assim a remoção da umidade sem a utilização de estufa com consumo de energia elétrica significativo. Além disso, faz-se importante a utilização de instrumentos de medição e controle documentado dos históricos de consumo de materiais e manufatura, para garantir dados mais apurados ao longo das etapas de produção de BFCV e melhoria dos procedimentos operacionais.

REFERÊNCIAS

- ADAMS, P. W. R.; SHIRLEY, J. E. J.; MCMANUS, M. C. Comparative cradle-to-gate life cycle assessment of wood pellet production with torrefaction. **Applied Energy**, v. 138, p. 367–380, 15 jan. 2015.
- ALMEIDA, R. M. et al. High Primary Production Contrasts with Intense Carbon Emission in a Eutrophic Tropical Reservoir. **Frontiers in Microbiology**, v. 7, p. 717, 2016.
- ALTHAUS, H.-J. et al. **Ecoinvent Report n°1: Overview and Methodology**. Dübendorf: Swiss Centre for Life Cycle Inventories, 2007.
- ARBEX, M. A. et al. Queima de biomassa e efeitos sobre a saúde. **Jornal Brasileiro de Pneumologia**, v. 30, p. 158–175, abr. 2004.
- AZAPAGIC, A.; CLIFT, R. Allocation of environmental burdens in multiple-function systems. **Journal of Cleaner Production**, v. 7, n. 2, p. 101–119, 1 mar. 1999.
- AZEVEDO, L. B. et al. Assessing the importance of spatial variability versus model choices in life cycle impact assessment: The case of freshwater eutrophication in Europe. **Environmental Science and Technology**, v. 47, n. 23, p. 13565–13570, 2013a.
- AZEVEDO, L. B. et al. Global assessment of the effects of terrestrial acidification on plant species richness. **Environmental Pollution**, v. 174, p. 10–15, 2013b.
- BAJWA, D. S. et al. A review of densified solid biomass for energy production. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 96, p. 296–305, 1 nov. 2018.
- BARRANTES, L. DE S. Avaliação do desempenho ambiental da produção de biomassa florestal com finalidades energéticas no Brasil: caso de Itapeva. 26 ago. 2016.
- BENETTO, E. et al. Life cycle assessment of heat production from grape marc pellets. **Journal of Cleaner Production**, v. 87, p. 149–158, 15 jan. 2015.
- BERGMAN, R. et al. Cradle-to-Gate Life Cycle Assessment of Switchgrass Fuel Pellets Manufactured in the Southeastern United States. **Wood and fiber science**, v. 47, p. 147–159, dez. 2014.
- BOULAY, A.-M. et al. The WULCA consensus characterization model for water scarcity footprints: assessing impacts of water consumption based on available water remaining (AWARE). **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 23, n. 2, p. 368–378, 2018.
- BRUGNERA, A. B. **Estudo da produção de briquetes com resíduos da indústria de carvão com aglutinantes**. Guarapuava: Universidade Estadual do Centro-Oeste, 2016.
- BURCK, J. et al. **Climate Change Performance Index - Results 2020: CCPI**. Alemannia: Instituto NewClimate, ONG Germanwatch e Climate Action Network, 2019.
- CABUZEL, T. **EU climate action and the European Green Deal**. Text. Disponível em: <https://ec.europa.eu/clima/policies/eu-climate-action_en>. Acesso em: 8 jun. 2020.

CARDOSO, M. T. **Desempenho de um sistema de forno-fornalha para combustão de gases na carbonização de madeira**. Dissertação (Mestrado em Manejo Florestal; Meio Ambiente e Conservação da Natureza; Silvicultura; Tecnologia e Utilização de—Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2010.

CELIK, I. et al. Life Cycle Assessment (LCA) of perovskite PV cells projected from lab to fab. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, Life cycle, environmental, ecology and impact analysis of solar technology. v. 156, p. 157–169, 1 nov. 2016.

CHAISUWAN, N. et al. The comparison of environmental impacts of carbonized briquettes from rain tree residues and coffee grounds/tea waste and traditional waste management. **International Journal of Environmental Science and Development**, v. 11, n. 1, p. 48–53, 2020.

CHIDUMAYO, E. N.; GUMBO, D. J. The environmental impacts of charcoal production in tropical ecosystems of the world: A synthesis. **Energy for Sustainable Development**, Special Issue on Charcoal. v. 17, n. 2, p. 86–94, 1 abr. 2013.

CHIEW, Y. L.; SHIMADA, S. Current state and environmental impact assessment for utilizing oil palm empty fruit bunches for fuel, fiber and fertilizer – A case study of Malaysia. **Biomass and Bioenergy**, v. 51, p. 109–124, 1 abr. 2013.

CLEARY, J. Life cycle assessments of municipal solid waste management systems: A comparative analysis of selected peer-reviewed literature. **Environment International**, v. 35, n. 8, p. 1256–1266, 1 nov. 2009.

COSME, N.; HAUSCHILD, M. Z. Effect factors for marine eutrophication in LCIA based on species sensitivity to hypoxia. **Ecological Indicators**, v. 69, p. 453–462, 2016.

COSTA, J. M. F. N. **Temperatura final de carbonização e queima dos gases na redução de metano, como base à geração de créditos de carbono**. Dissertação (Mestrado)—Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 17 out. 2012.

DE FONTES, P.J.; OKINO, E. Y. A; QUIRINO, W. F. **Aspectos Técnicos da Briquetagem do Carvão Vegetal no Brasil**: Série Técnica N° 1. Brasília: Laboratório de Produtos Florestais -LPF, 1989.

DE LA FUENTE, T. et al. Life cycle assessment of decentralized mobile production systems for pelletizing logging residues under Nordic conditions. **Journal of Cleaner Production**, v. 201, p. 830–841, 10 nov. 2018.

DE SCHRYVER, A. M. et al. Value choices in life cycle impact assessment of stressors causing human health damage. **Journal of Industrial Ecology**, v. 15, n. 5, p. 796–815, 2011.

DIAS, J. M. C. DE S. et al. **Produção de briquetes e pêletes a partir de resíduos agrícolas, agroindustriais e florestais**. 1a edição ed. Brasília, DF: Embrapa Agroenergia, 2012.

DONATO, D. et al. Propriedades de Briquetes Obtidos de Finos de Carvão Vegetal. **Revista Ciência da Madeira - RCM**, v. 6, p. 107–111, 31 ago. 2015.

EEA. **EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2019. Technical guidance to prepare national emission inventories**: EEA Report. EU: EEA, 2019. Disponível em: <10.2800/293657>. Acesso em: 16 fev. 2020.

EKVALL, T.; FINNVEDEN, G. Allocation in ISO 14041—a critical review. **Journal of Cleaner Production**, v. 9, n. 3, p. 197–208, 1 jun. 2001.

EPE, E. DE P. E. **Balanco Energético Nacional 2019**. Rio de Janeiro: EPE, maio 2019. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2019>>. Acesso em: 21 fev. 2020.

EU. **Directives on the Promotion of the Use of Energy from Renewable Sources**, 23 abr. 2009. Disponível em: <<https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2009/28/oj>>. Acesso em: 1 jul. 2020

FANTOZZI, F.; BURATTI, C. Life cycle assessment of biomass chains: Wood pellet from short rotation coppice using data measured on a real plant. **Biomass and Bioenergy**, Current and Potential Capabilities of Wood Production Systems in the Southeastern U.S. v. 34, n. 12, p. 1796–1804, 1 dez. 2010.

FARIA, F. A. M. DE et al. Estimating greenhouse gas emissions from future Amazonian hydroelectric reservoirs. **Environmental Research Letters**, v. 10, n. 12, p. 124019, dez. 2015.

FERREIRA, I. T. et al. ESTIMATIVA DO POTENCIAL ENERGÉTICO DE RESÍDUOS CELULÓSICOS DE FABRICAÇÃO DE PAPEL ATRAVÉS DE ANÁLISE IMEDIATA. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, v. 3, n. 4, 26 nov. 2014.

FRANÇA, D. DE A. et al. Pre-Harvest Sugarcane Burning: Determination of Emission Factors through Laboratory Measurements. **Atmosphere**, v. 3, n. 1, p. 164–180, mar. 2012.

FRANKFURT SCHOOL – UNEP. **Global trends in renewable energy investment 2019**. Alemannia: Frankfurt School-UNEP Centre/BNEF, 2019.

FRISCHKNECHT, R.; JOLLIET, O. **Global Guidance for Life Cycle Impact Assessment Indicators Volume 1**. Paris: UNEP/SETAC Life Cycle Initiative, 2016. Disponível em: <<<http://www.lifecycleinitiative.org/training-resources/global-guidance-lcia-indicators-v-1/>>>. Acesso em: 10 jun. 2020.

FRISCHKNECHT, R.; JOLLIET, O. **Global Guidance for Life Cycle Impact Assessment Indicators Volume 2**. Paris: UNEP/SETAC Life Cycle Initiative, 2019. Disponível em: <<<http://www.lifecycleinitiative.org/training-resources/global-guidance-lcia-indicators-v-2/>>>. Acesso em: 10 jun. 2020.

GAD, S. C. Photochemical Oxidants. In: WEXLER, P. (Ed.). **Encyclopedia of Toxicology (Third Edition)**. Oxford: Academic Press, 2014. p. 926–927.

GADE, A. L.; HAUSCHILD, M. Z.; LAURENT, A. Globally differentiated effect factors for characterising terrestrial acidification in life cycle impact assessment. **Science of The Total Environment**, v. 761, p. 143280, 20 mar. 2021.

GALVÃO, J.; BERMANN, C. Crise hídrica e energia: Conflitos no uso múltiplo das águas. **Estudos Avançados**, v. 29, p. 43–68, 1 ago. 2015.

GUINÉE, J. B.; HEIJUNGS, R. A proposal for the definition of resource equivalency factors for use in product life-cycle assessment. **Environmental Toxicology and Chemistry**, v. 14, n. 5, p. 917–925, 1995.

HARVEY, H.; ORVIS, R.; RISSMAN, J. **Designing Climate Solutions: A Policy Guide for Low-Carbon Energy**. 1. ed. Washington, United States: Island Press, 2019. v. 1

HAYASHI, K. et al. Expanded damage function of stratospheric ozone depletion to cover major endpoints regarding life cycle impact assessment. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 11, n. 3, p. 150–161, 2006.

HU, J. et al. Economic, environmental and social assessment of briquette fuel from agricultural residues in China – A study on flat die briquetting using corn stalk. **Energy**, v. 64, p. 557–566, 1 jan. 2014.

IBÁ, I. BRASILEIRA DE ÁRVORES. **Relatório Anual 2019**: Relatório. Brasília: Indústria Brasileira de Árvores, 2019. Disponível em: <<http://www.iba.org/>>. Acesso em: 28 fev. 2020.

IBICT, I. B. DE I. EM C. E T.-. **Guia Qualidata : requisitos de qualidade de conjuntos de dados para o Banco Nacional de Inventários do Ciclo de Vida | ACV - Ibict**. Brasília: [s.n.].

IGOS, E. et al. How to treat uncertainties in life cycle assessment studies? **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 24, n. 4, p. 794–807, 1 abr. 2019.

IPCC, I. P. ON C. C.-. **Climate Change 2013: The Physical Science Basis..** Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2013. Disponível em: <<https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/>>. Acesso em: 16 jul. 2020.

ISO, I. O. FOR S. **ISO 14040:2006. Environmental management – life cycle assessment – principles and framework**. Geneva, 2006.

ITO, M. **Life Cycle Assessment of PV systems**. [s.l.] IntechOpen, 2011.

JOOS, F. et al. Carbon dioxide and climate impulse response functions for the computation of greenhouse gas metrics: a multi-model analysis. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 13, n. 5, p. 2793–2825, 8 mar. 2013.

JRC, J. R. C.-. International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook-Recommendations for Life Cycle Impact Assessment in the European context. **EU Science Hub - European Commission**, 2011.

KYLILI, A.; CHRISTOFOROU, E.; FOKAIDES, P. A. Environmental evaluation of biomass pelleting using life cycle assessment. **Biomass and Bioenergy**, v. 84, p. 107–117, 1 jan. 2016.

LALMUANKIMA, H. T.; UPADHYAYA, K.; KATAKI, R. Impact of charcoal production activities on selected soil properties in Mizoram. **Environment and Ecology**, v. 37, n. 3A, p. 817–822, 2019.

LASCHI, A.; MARCHI, E.; GONZÁLEZ-GARCÍA, S. Environmental performance of wood pellets' production through life cycle analysis. **Energy**, v. 103, p. 469–480, 15 maio 2016.

LECHÓN, Y. et al. **Análisis de Ciclo de Vida comparativo del etanol de cereales y de la gasolina. Energía y Cambio Climático**. Universidad Politécnica de Valencia ed. Valencia: Centro de Publicaciones Secretaria General Técnica Ministerio de Medio Ambiente, 2005.

LENZEN, M. Uncertainty in Impact and Externality Assessments - Implications for Decision-Making (13 pp). **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 11, n. 3, p. 189–199, 1 maio 2006.

LI, X. et al. Life cycle assessment of densified wheat straw pellets in the Canadian Prairies. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 17, n. 4, p. 420–431, 1 maio 2012.

LÓPEZ, G. J. et al. Cálculo de los productos de la combustión empleando métodos numéricos. **Mecánica Computacional**, v. XXII, p. 15, 2003.

LU, D. et al. Comparison of pretreatment methods for wheat straw densification by life cycle assessment study. **Transactions of the ASABE**, v. 58, n. 2, p. 453–464, 2015.

MANANDHAR, A.; SHAH, A. Life cycle assessment of feedstock supply systems for cellulosic biorefineries using corn stover transported in conventional bale and densified pellet formats. **Journal of Cleaner Production**, v. 166, p. 601–614, 10 nov. 2017.

MAYER, F.; BHANDARI, R.; GÄTH, S. Critical review on life cycle assessment of conventional and innovative waste-to-energy technologies. **Science of The Total Environment**, v. 672, p. 708–721, 1 jul. 2019.

MIRANDA SANTOS, S. D. F. DE O. et al. Life Cycle Analysis of Charcoal Production in Masonry Kilns with and without Carbonization Process Generated Gas Combustion. **Sustainability**, v. 9, n. 9, p. 1558, set. 2017.

MMA, M. DO M. A.-. **Política Nacional sobre Mudança do Clima**. Disponível em: <<https://www.mma.gov.br/clima/politica-nacional-sobre-mudanca-do-clima>>. Acesso em: 7 abr. 2020.

MMA, M. DO M. A.-. **A caminho da siderurgia sustentável**. Disponível em: <<https://www.mma.gov.br/informma/item/14576-noticia-acom-2018-01-2802.html>>. Acesso em: 30 abr. 2020.

MUAZU, R. I.; BORRION, A. L.; STEGEMANN, J. A. Life cycle assessment of biomass densification systems. **Biomass and Bioenergy**, v. 107, p. 384–397, 1 dez. 2017.

MUENCH, S.; GUENTHER, E. A systematic review of bioenergy life cycle assessments. **Applied Energy**, v. 112, p. 257–273, 1 dez. 2013.

MURPHY, F.; DEVLIN, G.; MCDONNELL, K. Miscanthus production and processing in Ireland: An analysis of energy requirements and environmental impacts. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 23, p. 412–420, 2013.

MUTERI, V. et al. Review on Life Cycle Assessment of Solar Photovoltaic Panels. **Energies**, v. 13, n. 1, p. 252, jan. 2020.

NGUYEN, L. et al. Uncertainties in Life Cycle Greenhouse Gas Emissions from Advanced Biomass Feedstock Logistics Supply Chains in Kansas. **Energies**, v. 7, n. 11, p. 7125–7146, nov. 2014.

NJENGA, M. et al. Additional cooking fuel supply and reduced global warming potential from recycling charcoal dust into charcoal briquette in Kenya. **Journal of Cleaner Production**, v. 81, p. 81–88, 15 out. 2014.

NOGUEIRA, L. A. H. **Dendroenergia - Fundações e Aplicações**. 2a. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2003.

NUSS, E. T.; TANUMIHARDJO, S. A. Maize: A Paramount Staple Crop in the Context of Global Nutrition. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety**, v. 9, n. 4, p. 417–436, 2010.

NWOKOLO, N.; MAMPHWELI, S.; MAKAKA, G. Analytical and thermal evaluation of carbon particles recovered at the cyclone of a downdraft biomass gasification system. **Sustainability (Switzerland)**, v. 9, n. 4, 2017.

OLIVEIRA, R. R. L. DE. Moldagem de briquetes com finos de carvão vegetal aglutinados com parafina: caracterização de algumas propriedades. 7 fev. 2013.

PAGANI, R. N.; KOVALESKI, J. L.; RESENDE, L. M. Methodi Ordinatio: a proposed methodology to select and rank relevant scientific papers encompassing the impact factor, number of citation, and year of publication. **Scientometrics**, v. 105, n. 3, p. 2109–2135, 1 dez. 2015.

PAS 2050. **How to Assess the Carbon Footprint of Goods and Services**: Crown and Carbon Trust. London, UK: British Standards Institution - BSI, 2008. Disponível em: <<http://www.fao.org/sustainable-food-value-chains/library/details/en/c/266040/>>. Acesso em: 1 jul. 2020.

PIEROBON, F. et al. Life cycle environmental impact of firewood production – A case study in Italy. **Applied Energy**, v. 150, p. 185–195, 15 jul. 2015.

PNUD, P. DAS N. U. PARA O D. **Projeto Siderurgia Sustentável**. Disponível em: <<https://www.br.undp.org/content/brazil/pt/home/projects/SiderurgiaSustentvel.html>>. Acesso em: 30 abr. 2020.

PORSÖ, C. et al. Time-Dependent Climate Impact and Energy Efficiency of Internationally Traded Non-torrefied and Torrefied Wood Pellets from Logging Residues. **BioEnergy Research**, v. 11, p. 139–151, 2018.

PORTMANN, R. W.; DANIEL, J. S.; RAVISHANKARA, A. R. Stratospheric ozone depletion due to nitrous oxide: influences of other gases. **Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences**, v. 367, n. 1593, p. 1256–1264, 5 maio 2012.

PRASAD, P. V. V.; KAKANI, V. G.; REDDY, K. R. Ozone Depletion. In: THOMAS, B.; MURRAY, B. G.; MURPHY, D. J. (Eds.). . **Encyclopedia of Applied Plant Sciences (Second Edition)**. Oxford: Academic Press, 2017. p. 318–326.

RAAD, T. J.; MELO, V. F.; OLIVERIA, A. C. **Fornos metálicos para produção de carvão vegetal**. Forum apresentado em III FORUM NACIONAL SOBRE CARVÃO VEGETAL. Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil, 22 out. 2014.

RAICV, R. DE P. DE A. DO I. DO C. DE V.-. **Recomendação de modelos de Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida para o contexto brasileiro**. Brasília, DF: Ibict, 2019.

RAJABI HAMEDANI, S. et al. Comparative energy and environmental analysis of agro-pellet production from orchard woody biomass. **Biomass and Bioenergy**, v. 129, p. 105334, 1 out. 2019.

REN21. **Renewables 2019 Global Status Report: Global Status Report**. Paris: REN21 Secretariat, 2019.

RENDEIRO, G. et al. **Combustão e gasificação de biomassa sólida**. 1a. ed. Brasília: Ministério de Minas e Energia (MME), 2008.

RODRIGUES G. S. et al. Produção de briquetes para queima utilizando finos da produção de carvão vegetal e glicerina. **Holos**, v. 01, 2017.

ROSENBAUM, R. K. et al. USEtox - The UNEP-SETAC toxicity model: Recommended characterisation factors for human toxicity and freshwater ecotoxicity in life cycle impact assessment. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 13, n. 7, p. 532–546, 2008.

ROUSSET, P. et al. LCA of eucalyptus wood charcoal briquettes. **Journal of Cleaner Production - J CLEAN PROD**, v. 19, p. 1647–1653, 1 set. 2011.

SABA, S.; EL BACHAWATI, M.; MALEK, M. Cradle to grave Life Cycle Assessment of Lebanese biomass briquettes. **Journal of Cleaner Production**, v. 253, p. 119851, 20 abr. 2020.

SANDIN, G. et al. Allocation in LCAs of biorefinery products: implications for results and decision-making. **Journal of Cleaner Production**, v. 93, p. 213–221, 15 abr. 2015.

SEDANO, F. et al. The impact of charcoal production on forest degradation: a case study in Tete, Mozambique. **Environmental Research Letters**, v. 11, n. 9, p. 094020, set. 2016.

SENGER, R. **Análise do rendimento térmico de uma caldeira alimentada com lenha em toras**. Ponta Grossa: UTFPR, 2015.

SILVA, F. B. et al. Relevance of including capital goods in the life cycle assessment of construction products. **LALCA: Revista Latino-Americana em Avaliação do Ciclo de Vida**, v. 2, n. 2 esp., p. 7–22, 19 nov. 2018.

SIMONELLI, G. et al. PRODUÇÃO DE BRIQUETES PARA QUEIMA UTILIZANDO FINOS DA PRODUÇÃO DE CARVÃO VEGETAL E GLICERINA. **HOLOS**, v. 1, n. 0, p. 325–335, 18 jul. 2017.

SIQUEIRA, H. F. DE. Aproveitamento dos gases da carbonização para secagem da madeira e produção de carvão vegetal. 16 abr. 2021.

SPERANZA, J. et al. **Monitoramento da implementação da política climática brasileira: implicações para a Contribuição Nacionalmente Determinada**. São Paulo, Brasil: World Resources Institute - Brasil, 2017. Disponível em: <<https://wribrasil.org.br/pt/blog/2017/10/relatorio-analisa-implementacao-politica-climatica-brasileira>>. Acesso em: 7 abr. 2020.

TABATA, T.; OKUDA, T. Life cycle assessment of woody biomass energy utilization: Case study in Gifu Prefecture, Japan. **Energy**, The 24th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy, ECOS 2011. v. 45, n. 1, p. 944–951, 1 set. 2012.

THIAGO DE PAULA PROTÁSIO. **Características de crescimento, madeira e carvão para classificação de clones de Eucalyptus spp. visando o uso energético**. Doutorado—LAVRAS - MG: Universidade Federal de Lavras, 2016.

TSALIDIS, G.-A. et al. Life cycle assessment of direct co-firing of torrefied and/or pelletised woody biomass with coal in The Netherlands. v. 81, p. 168–177, 2014.

UGAYA, C. M. L. et al. **Faço o que eu digo: ACV ambiental, social e econômica do Gyro**. . In: VII CONGRESSO BRASILEIRO SOBRE GESTÃO DO CICLO DE VIDA-GCV2020. Gramado (RS): dez. 2020.

VAN ZELM, R. et al. Regionalized life cycle impact assessment of air pollution on the global scale: Damage to human health and vegetation. **Atmospheric Environment**, v. 134, p. 129–137, 2016.

VILLABONA, Y. P.; KAFAROV, V. Methodology for the Life Cycle Assessment (LCA) in combustion processes where the fuel is pelleted agricultural biomass. **Chemical Engineering Transactions**, v. 64, p. 427–432, 2018.

VILLAZÓN MONTALVÁN, R. A. et al. Environmental concerns on traditional charcoal production: a global environmental impact value (GEIV) approach in the southern Brazilian context. **Environment, Development and Sustainability**, v. 21, n. 6, p. 3093–3119, 1 dez. 2019.

WANG, Z. et al. Life cycle environmental impacts of cornstalk briquette fuel in China. **Applied Energy**, v. 192, p. 83–94, 15 abr. 2017.

WEIDEMA, B. P.; WESNÆS, M. S. Data quality management for life cycle inventories—an example of using data quality indicators. **Journal of Cleaner Production**, v. 4, n. 3, p. 167–174, 1 jan. 1996.

WMO, W. M. O.-. **Scientific assessment of ozone depletion: 2010**,: Global Ozone Research and Monitoring Project-report no.52. Geneva: World Meteorological Organization, 2011.

ZUMSTEG, J. M.; COOPER, J. S.; NOON, M. S. Systematic Review Checklist. **Journal of Industrial Ecology**, v. 16, n. s1, p. S12–S21, 2012.

APÊNDICE

Apêndice A — Resumo dos estudos sobre a ACV da densificação da biomassa.....	81
Apêndice B — Formulário de coleta de dados <i>in loco</i>	84
Apêndice C — Cálculos dos produtos da combustão incompleta.....	85
Apêndice D — Cálculo estequiométrico do ar necessário para a queima do combustível	90
Apêndice E — Metodologia para calcular o calor necessário no processo de secagem	94
Apêndice F — Metodologia para o dimensionamento do sistema de solar fotovoltaico	96

Apêndice A — Resumo dos estudos sobre a ACV da densificação da biomassa

Referência	Matéria-prima	Tecnologia de conversão	Limite do sistema	Função	Unidade Funcional	Método
(Saba; El Bachawati; Malek, 2020)	Palha de azeitona	Briquetagem	cradle-to-grave	Calor	1 MJ	IMPACT 2002 +
(Chaisuwan et al., 2020)	Resíduos de Árvores Tropicais Moagem do café Resíduos de Chá	Briquetagem	cradle-to-grave	Calor	Não especificado	CML
(Rajabi Hamedani et al., 2019)	Palha de azeitona	Peletização	cradle-to-gate	Calor	1 MJ	ReCiPe Midpoint
(Porsö et al., 2018)	Serragem/Cavacos de Madeira	Peletização	cradle-to-gate	Eletricidade	1 GJ	Não especificado
(Villabona; Kafarov, 2018)	Resíduos agropecuários	Peletização	cradle-to- cradle	Eletricidade	1 kg	ReCiPe Midpoint
(Manandhar; Shah, 2017)	Palha de Milho	Peletização	cradle-to-gate	Não especificado	1 t	TRACI
(De la Fuente et al., 2018)	Serragem/Cavacos de Madeira	Peletização	gate-to-gate	Não especificado	1 t	ReCiPe Midpoint
(Wang et al., 2017)	Palha de Milho	Briquetagem	cradle-to-grave	Calor	1 t	ReCiPe Midpoint
(Kylili; Christoforou; Fokaidis, 2016)	Palha de azeitona	Peletização	gate-to-gate	Calor	1 t	Não especificado

Referência	Matéria-prima	Tecnologia de conversão	Limite do sistema	Função	Unidade Funcional	Método
(Laschi; Marchi; González-García, 2016)	Serragem/Cavacos de Madeira	Peletização	cradle-to-gate	Eletricidade	1 kg	ReCiPe Midpoint
(Adams; Shirley; Mcmanus, 2015)	Serragem/Cavacos de Madeira	Peletização	cradle-to-gate	Eletricidade	1 t	ReCiPe Midpoint
(Lu et al., 2015)	Palha de trigo	Peletização	gate-to-gate	Calor	1 kg	CML
(Bergman et al., 2014)	Switchgrass	Peletização	cradle-to-gate	Não especificado	1 t	TRACI
(Benetto et al., 2015)	Bagaço de uvas	Peletização	cradle-to-gate	Calor	1 MJ	ReCiPe Midpoint
(Tsalidis et al., 2014)	Serragem/Cavacos de Madeira	Peletização	cradle-to-gate	Eletricidade	1 kWh	CML
(Hu et al., 2014)	Palha de Milho	Briquetagem	gate-to-grid	Eletricidade	Não especificado	Não especificado
(Nguyen et al., 2014)	Palha de Milho	Peletização	cradle-to-gate	Calor	1 MJ	Não especificado
(Njenga et al., 2014)	Finos de carvão	Operação Manual	cradle-to-grid	Calor	1 kg	Não especificado
(MURPHY; DEVLIN; MCDONNELL, 2013)	Miscanthus	Briquetagem e Peletização	cradle-to-gate	Calor/Eletricidade	1 GJ	CML

Referência	Matéria-prima	Tecnologia de conversão	Limite do sistema	Função	Unidade Funcional	Método
(CHIEW; SHIMADA, 2013)	Cachos vazios de frutas	Briquetagem	gate-to-gate	Eletricidade	1 t	CML
(LI et al., 2012)	Palha de trigo	Peletização	cradle-to-gate	Calor	1 kg	CML
(ROUSSET et al., 2011)	Finos de carvão	Briquetagem	cradle-to-gate	Calor	1 kg	CML
(FANTOZZI; BURATTI, 2010)	Serragem/Cavacos de Madeira	Peletização	cradle-to-grave	Calor	1 MJ	EcoIndicator 99 EPS 2000 EDIP

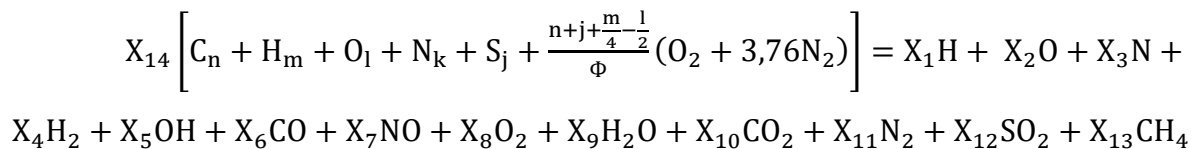
Fonte: Autoria própria

Apêndice C — Cálculos dos produtos da combustão incompleta

Considerou-se os seguintes componentes na saída dos gases: H, O, N, H₂, OH, CO, NO, O₂, H₂O, CO₂, N₂, SO₂ e CH₄. Adotou-se a análise elementar da madeira do eucalipto em base seca e livre de cinzas (THIAGO DE PAULA PROTÁSIO, 2016).

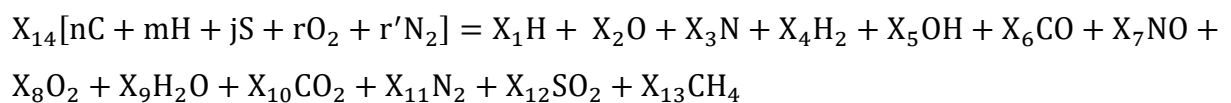
Elemento	Símbolo	(wt%)	PM (kg/kmol)	Relação wt%/ PM	Relação pelo menor valor	Relação X _i / C	Relação X _i / C	Fórmula empírica
Carbono	C _n	44,667	12	3,7222	5025,7890	1,0000	100,00	
Oxigênio	O _l	48,757	16	3,0473	4114,4895	0,8187	82,00	
Hidrogênio	H _m	5,681	1	5,6807	7670,1435	0,5262	53,00	C ₁₀₀ H ₅₂ O ₈₂ N ₂ S _{0,02}
Nitrogênio	N _k	0,877	14	0,0626	84,5521	0,0168	2,00	
Enxofre	S _j	0,024	32	0,0007	1,0000	0,0002	0,02	

O carburante usado no processo de carbonização é o ar, com uma composição de 21% de oxigênio e 79% de nitrogênio. Com esta informação e seguindo a metodologia proposta por López et al. (2003), pode-se então escrever a equação da combustão para realizar o balanço estequiométrico, como segue:



Com o intuito de favorecer a simplificação, foi considerado que:

$$r_o = \frac{n + j + \frac{m}{4} - \frac{l}{2}}{\phi} \quad r' = \frac{k}{2} + 3,76 \cdot r_o \quad r = \frac{l}{2} + r_o$$



Realizando o balanço para cada elemento, tem-se que:

1- Balanço do Carbono:

$$nX_{14} = X_6 + X_{10} + X_{13}$$

2- Balanço do Hidrogênio:

$$mX_{14} = X_1 + 2X_4 + X_5 + 2X_9 + 4X_{13}$$

3- Balanço do Oxigênio:

$$2rX_{14} = X_2 + X_5 + X_6 + X_7 + 2X_8 + X_9 + 2X_{10} + 2X_{12}$$

4- Balanço do Nitrogênio:

$$2r'X_{14} = X_3 + X_7 + 2X_{11}$$

5- Balanço do Enxofre:

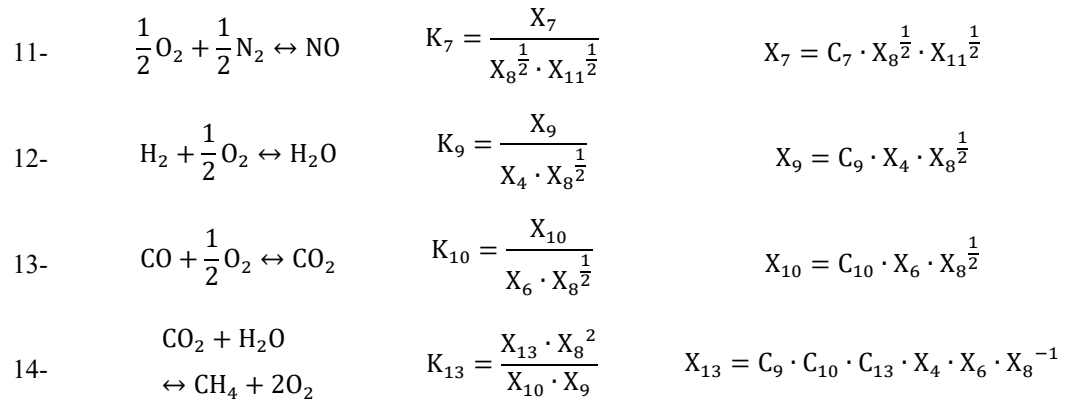
$$jX_{14} = X_{12}$$

6- Balanço geral de moles:

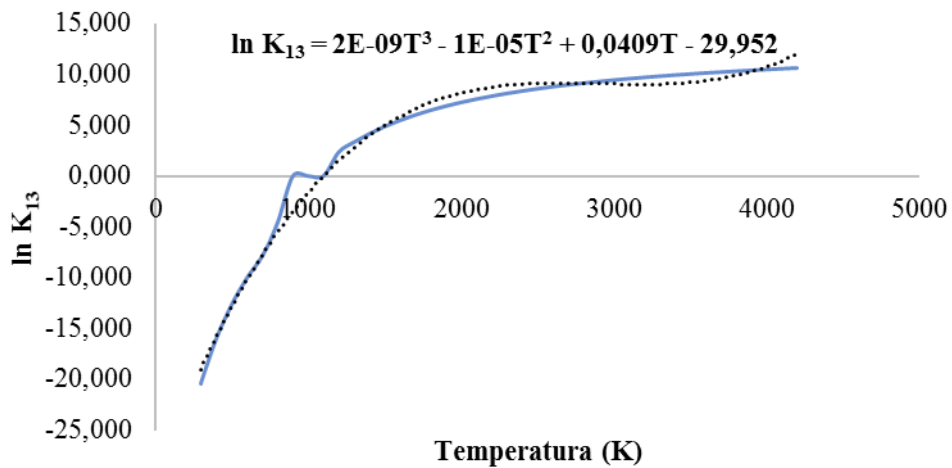
$$\sum_{i=1}^{12} X_i = 1$$

O sistema total possui um total de 14 incógnitas, para as quais são necessárias oito (8) equações a mais, em consequência são consideradas as reações de dissociação em equilíbrio:

Equação	Reação	Constante de equilíbrio	Equação definida para as X_i
7-	$\frac{1}{2}H_2 \leftrightarrow H$	$K_1 = \frac{X_1}{X_4^{\frac{1}{2}}}$	$X_1 = C_1 \cdot X_4^{\frac{1}{2}}$
8-	$\frac{1}{2}O_2 \leftrightarrow O$	$K_2 = \frac{X_2}{X_8^{\frac{1}{2}}}$	$X_2 = C_2 \cdot X_8^{\frac{1}{2}}$
9-	$\frac{1}{2}N_2 \leftrightarrow N$	$K_3 = \frac{X_3}{X_{11}^{\frac{1}{2}}}$	$X_3 = C_3 \cdot X_{11}^{\frac{1}{2}}$
10-	$\frac{1}{2}H_2 + \frac{1}{2}O_2 \leftrightarrow OH$	$K_5 = \frac{X_5}{X_4^{\frac{1}{2}} \cdot X_8^{\frac{1}{2}}}$	$X_5 = C_5 \cdot X_4^{\frac{1}{2}} \cdot X_8^{\frac{1}{2}}$



No presente trabalho, as constantes de equilíbrio foram calculadas para o intervalo de temperatura de 298 a 4000K, tomando os dados termodinâmicos de JANAF *Thermochemical Tables*, (1985). Esses dados foram ajustados pelo método de mínimos quadrados, para obter os polinômios e dessa forma obter as constantes de equilíbrio para o caso de estudo. A modo de exemplo, mostra-se o ajuste para o CH₄.



A seguinte tabela apresenta o ajuste para as diferentes constante de equilíbrio:

Constante	$\log K = A_3T^3 + A_2T^2 + A_1T + A_0$				ln K	K
	A ₃	A ₂	A ₁	A ₀		
Reação						

$\frac{1}{2}\text{H}_2 \leftrightarrow \text{H}$	9,77E-10	-8,61E-06	2,59E-02	-27,58544	-10,88	1,88E-05
$\frac{1}{2}\text{O}_2 \leftrightarrow \text{O}$	1,12E-09	-9,83E-06	2,95E-02	-31,37625	-12,35	4,31E-06
$\frac{1}{2}\text{N}_2 \leftrightarrow \text{N}$	2,11E-09	-1,86E-05	5,57E-02	-62,24805	-26,35	3,61E-12
$\frac{1}{2}\text{H}_2 + \frac{1}{2}\text{O}_2 \leftrightarrow \text{OH}$	1,69E-10	-1,49E-06	4,46E-03	-4,489091	-1,62	1,99E-01
$\frac{1}{2}\text{O}_2 + \frac{1}{2}\text{N}_2 \leftrightarrow \text{NO}$	4,02E-10	-3,54E-06	1,06E-02	-11,79922	-4,98	6,89E-03
$\text{H}_2 + \frac{1}{2}\text{O}_2 \leftrightarrow \text{H}_2\text{O}$	-1,09E-09	9,62E-06	-2,89E-02	31,18744	12,55	2,83E+05
$\text{CO} + \frac{1}{2}\text{O}_2 \leftrightarrow \text{CO}_2$	-1,75E-09	1,54E-05	-4,62E-02	54,41752	24,67	5,19E+10
$\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 \leftrightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$	2,00E-09	-1,00E-05	4,09E-02	-29,952	-0,53	2,93E-01

Voltando aos balanços de cada um dos elementos, reduzindo o número de equações, fazendo as devidas substituições e simplificando, temos quatro equações não lineares:

$$1 - C_1 \cdot X_4^{\frac{1}{2}} + 2 \cdot X_4 + C_5 \cdot X_4^{\frac{1}{2}} \cdot X_8^{\frac{1}{2}} + 2 \cdot C_9 \cdot X_4 \cdot X_8^{\frac{1}{2}} - d_1 \cdot X_6 - d_1 \cdot C_{10} \cdot X_6 \cdot X_8^{\frac{1}{2}} + d_2 \cdot C_9 \cdot C_{10} \cdot C_{13} \cdot X_4 \cdot X_6 \cdot X_8^{-1}$$

$$2 - C_2 \cdot X_8^{\frac{1}{2}} + C_5 \cdot X_4^{\frac{1}{2}} \cdot X_8^{\frac{1}{2}} + d_6 X_6 + C_7 \cdot X_8^{\frac{1}{2}} \cdot X_{11}^{\frac{1}{2}} + 2 \cdot X_8 + C_9 \cdot X_4 \cdot X_8^{\frac{1}{2}} + d_7 \cdot C_{10} \cdot X_6 \cdot X_8^{\frac{1}{2}} + d_3 \cdot C_9 \cdot C_{10} \cdot C_{13} \cdot X_4 \cdot X_6 \cdot X_8^{-1}$$

$$3 - C_3 \cdot X_{11}^{\frac{1}{2}} + C_7 \cdot X_8^{\frac{1}{2}} \cdot X_{11}^{\frac{1}{2}} + 2 \cdot X_{11} - d_4 \cdot X_6 - d_4 \cdot C_{10} \cdot X_6 \cdot X_8^{\frac{1}{2}} - d_4 \cdot C_9 \cdot C_{10} \cdot C_{13} \cdot X_4 \cdot X_6 \cdot X_8^{-1}$$

$$4 - C_1 \cdot X_4^{\frac{1}{2}} + C_2 \cdot X_8^{\frac{1}{2}} + C_3 \cdot X_{11}^{\frac{1}{2}} + X_4 + C_5 \cdot X_4^{\frac{1}{2}} \cdot X_8^{\frac{1}{2}} + d_8 \cdot X_6 + C_7 \cdot X_8^{\frac{1}{2}} \cdot X_{11}^{\frac{1}{2}} + X_8 + C_9 \cdot X_4 \cdot X_8^{\frac{1}{2}} + d_8 \cdot C_{10} \cdot X_6 \cdot X_8^{\frac{1}{2}} + X_{11} + d_8 \cdot C_9 \cdot C_{10} \cdot C_{13} \cdot X_4 \cdot X_6 \cdot X_8^{-1} - 1$$

Com as equações definidas, tem-se então a possibilidade de obter os valores para os produtos da combustão, o cálculo foi feito usando *Scilab Online*.

Apêndice D — Cálculo estequiométrico do ar necessário para a queima do combustível

A queima do cavaco de madeira de pinus foi considerada completa (NOGUEIRA, 2003). Portanto, foi realizado o cálculo estequiométrico do ar necessário para a queima deste material. A análise elementar do combustível (NWOKOLO; MAMPHWELI; MAKAKA, 2017), conforme apresentado na Tabela 13 :

Tabela 13 — Análises elementar do cavaco de pinus

Análises elementar (wt %)	Símbolo	(wt%)	PM (kg/kmol)	Relação wt% / PM
Conteúdo de umidade	W	14,00	-	-
Carbono fixo	CF	17,88	-	-
Cinzas	C	0,40	-	-
Material Volátil	MV	67,72	-	-
Carbono	C	47,51	12,0110	3,95554
Oxigênio	O	45,87	15,9994	2,86698
Hidrogênio	H	6,52	1,0079	6,46890
Nitrogênio	N	0,10	14,0067	0,00678
Enxofre	S	0,01	32,0600	0,00016

Fonte: adaptado do Nwokolo; Mamphweli; Makaka (2017)

Com esses dados é possível definir a equação para o balanço estequiométrico (na base molar):

$$3,95 \cdot C + 2,86 \cdot O + 6,46 \cdot H + 0,006 \cdot N + 0,00016 \cdot S + X \cdot (O_2 + 3,7619 \cdot N_2) \\ \rightarrow a \cdot CO_2 + b \cdot SO_2 + d \cdot H_2O + g \cdot N_2$$

Onde, o balanço por elemento é:

Elemento	Entrada	=	a	b	d	g	X
Carbono	3,95554	=	1	0	0	0	0
Oxigênio	2,86698	=	2	2	1	0	-2
Hidrogênio	6,46890	=	0	0	2	0	0
Nitrogênio	0,00678	=	0	0	0	2	-7,5238
Enxofre	0,00016	=	0	1	0	0	0

Resolvendo o sistema de equação de forma simultânea, aplicando as funções do software Excel: Minversa e Mmult, para o cálculo da inversa e multiplicação entre matrizes, respectivamente. Desta forma, foi possível obter os valores de a, b, d, g, X. Os resultados são apresentados a seguir:

Incógnitas		Valores
a	=	3,95554
b	=	0,00016
d	=	3,23445
g	=	15,57553
X	=	4,13944

Portanto, a equação de combustão teórica é:

$$3,95 \cdot C + 2,86 \cdot O + 6,46 \cdot H + 0,006 \cdot N + 0,00016 \cdot S + 4,13 \cdot (O_2 + 3,7619 \cdot N_2) \\ \rightarrow 3,95 \cdot CO_2 + 0,00016 \cdot SO_2 + 3,23 \cdot H_2O + 15,57 \cdot N_2$$

Após encontrada a equação estequiométrica, foi calculada a equação real de combustão com excesso de ar (Φ), sendo ela:

$$3,95 \cdot C + 2,86 \cdot O + 6,46 \cdot H + 0,006 \cdot N + 0,0001 \cdot S + X \cdot \Phi \cdot (O_2 + 3,7619 \cdot N_2) \\ \rightarrow ar \cdot CO_2 + br \cdot SO_2 + dr \cdot H_2O + er \cdot CO + fr \cdot O_2 + gr \cdot N_2$$

Onde, o balanço por elemento é:

Elemento	Entrada	=	ar	br	dr	er	fr	gr	X·Φ
Carbono	3,95554	=	1	0	0	1	0	0	0
Oxigênio	2,86698	=	2	2	1	1	2	0	-2
Hidrogênio	6,46890	=	0	0	2	0	0	0	0
Nitrogênio	0,00678	=	0	0	0	0	0	2	-7,5238
Enxofre	0,00016	=	0	1	0	0	0	0	0

Pode-se observar que o número de incógnitas é maior do que o número de equações, consequentemente foram requeridas mais duas equações. Porém, foi necessário usar medidas feitas no trabalho para o O₂ e o CO. As medições correspondem a uma chaminé semelhante ao sistema subestudo. Os valores encontrados foram de 18% para o O₂ e 597,1 ppm para o CO, com isso e considerando a fração volumétrica de cada gás, se obtém:

$$0,18 = \frac{fr}{ar + br + dr + er + gr}$$

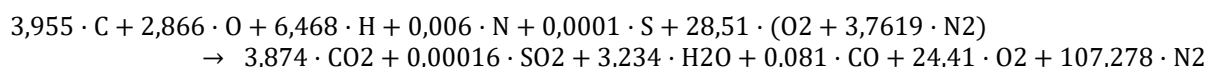
$$0,0005971 = \frac{br}{ar + br + dr + er + gr}$$

Elemento	Entrada		ar	br	dr	er	fr	gr	X·Φ
Carbono	3,95554	=	1	0	0	1	0	0	0
Oxigênio	2,86698	=	2	2	1	1	2	0	-2
Hidrogênio	6,46890	=	0	0	2	0	0	0	0
Nitrogênio	0,00678	=	0	0	0	0	0	2	-7,5238
Enxofre	0,00016	=	0	1	0	0	0	0	0
O ₂	0	=	0,2195	0,2195	0	0,2195	-1	0,2195	0
CO	0	=	0,0005	0,0005	0	-1	0,0005	0,0005	0

Diante disso, foi possível resolver as incógnitas (de forma semelhante ao procedimento para encontrar a equação de combustão teórica). Os resultados são apresentados a seguir:

Incógnitas	Valores
ar	= 3,87454
br	= 0,00016
dr	= 3,23445
er	= 0,08100
fr	24,41724
gr	107,27839
X·Φ	= 28,51618

Com esses resultados, pode-se definir a seguinte equação de combustão real:



Com os valores das moles de cada substância e seus respectivos pesos moleculares, é possível calcular a massa de cada uma delas, e suas respectivas porcentagens. É importante ter em consideração o fluxo de referência de 4,15E-02 kg de BFCV. Com isso é factível definir a quantidade cavaco de madeira de pinus requerida. No caso deste estudo, são requeridas 3.000 kg de cavaco de madeira de pinus, para a produção de 18.000 kg de briquete seco, num ciclo de secagem de 36h. Portanto, o total de pinus para atender o fluxo de referência é de 0,007 kg, valor para o qual é calculada as emissões.

Sustância	kmol	PM (kg/kmol)	kg	Porcentagem dos gases úmidos (%)	Emissão para 0,007 kg de Cavaco
CO ₂	3,87454	44,0098	170,51773	4,24425%	0,011936254
SO ₂	0,00016	64,0588	0,01025	0,00026%	0,000000717
H ₂ O	3,23445	18,01520	58,26926	1,45034%	0,004078853
CO	0,08100	28,0104	2,26884	0,05647%	0,000158819
O ₂	24,41724	31,9988	781,32238	19,44739%	0,054692627
N ₂	107,27839	28,0134	3005,23245	74,80129%	0,210366502

Apêndice E — Metodologia para calcular o calor necessário no processo de secagem

No processo de secagem dos BFCV acontecem dois tipos de aquecimento; o primeiro, o calor sensível (Q_{Sen}), onde ocorre uma variação de temperatura, desde a temperatura ambiente inicial até a temperatura de secagem final, sem evaporação da água presente; e o segundo, calor latente (Q_{Lat}), onde o conteúdo de água do produto evapora à temperatura de secagem correspondente.

O calor total necessário para a secagem do BFCV, desde a temperatura inicial (T_i) até a temperatura final de secagem (T_f), foi calculado como a soma do calor sensível mais o calor latente de evaporação da água, de acordo com a equação seguinte:

$$Q_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{\left[(m_{\text{H}_2\text{O}})_e \cdot C_{p_{\text{H}_2\text{O}}} \cdot (T_f - T_i) \right] + (m_{\text{H}_2\text{O}})_e \cdot h_{\text{fg}}}{t}$$

Onde:

$(m_{\text{H}_2\text{O}})_e$ é a quantidade total de água evaporada no processo de secagem, kg;

$C_{p_{\text{H}_2\text{O}}}$ é o calor específico da água, foi avaliada a temperatura média aritmética entre a temperatura ambiente e a temperatura de secagem do BFCV, J/kg · K;

T_i é a temperatura inicial, °C;

T_f é a temperatura final, °C;

h_{fg} é a entalpia de vaporização da água, foi avaliada a temperatura de secagem, J/kg

t é tempo em segundos do processo de secagem, s.

Com as informações levantadas calculou-se o calor necessário no processo de secagem, como mostrado na continuação.

Parâmetro	Quantidade	Unidade
M_{H_2O}	0,00439	kg
Ti	25,0	°C
Tf	70,0	°C
Tcp	47,5	°C
Cp	4.179	J/kg · K
h_{fg}	2.334.000	J/kg
t	129.600	s
Q_{total}	0,35736	Cal/UF
Q_{total}	3,57E-07	Mcal/UF

Seguido, foi calculado o calor gerado na queima dos gases:

Sólidos	Massa (kg)	PCS (kcal/kg)	Energia (Mcal)
Madeira Seca Enfornada		4.550	0,000000
Carvão		7.889	0,000000
Atiço		6.051	0,000000
Finos		7.889	0,000000
Gases Não Condensáveis			
CO	0,012074	2.412	0,029122
CH ₄	0,000961	13.249	0,012738
C ₂ H ₆	0,000047	12.384	0,000576
H ₂	0,000000	33.883	0,000000
Gases Condensáveis			
CH ₃ OH	0,003172	5.692	0,018056
Alcatrão solúvel	0,020524	5.255	0,107853
Alcatrão insolúvel	0,013633	5.255	0,071640
Total de Gases			2,40E-01

Como o calor gerado na queima dos gases é maior do que o requerido para remover toda a umidade, pode-se considerar viável o aproveitamento dos gases combustos.

Apêndice F — Metodologia para o dimensionamento do sistema de solar fotovoltaico

O primeiro passo é o cálculo do Consumo de energia da fábrica.

Equipamento	Potência nominal		Quantidade	Horas/dias	Dias/Mês	kW/mês
	CV	Watt				
Esteira transportadora vibratória	1	735,5	1	9	21	139,0
Dosador Vibratório	1	735,5	1	9	21	139,0
Sistemas de Ventilação e Exaustão industrial	7,5	5.516,2	1	9	21	1.042,6
Motor 1 Rosca Sem Fim de alimentação dos FCV 1	3	2.206,5	1	9	21	417,0
Motor 1 Rosca de transporte dos FCV 2	2	1.471,0	1	9	21	278,0
Motor 3 Rosca Sem Fim de alimentação do amido	0,5	367,7	1	9	21	69,5
Motor 4 Rosca de transporte da mistura	2	1.471,0	1	9	21	278,0
Motor 5 Extrusora	10	7.355,0	1	9	21	1.390,1
Maquina Costurar Saco De Rafia Sacaria	1	735,5	2	9	21	278,0
Total consumo médio mensal				4.031,3		
Total consumo médio diário				192,0		

Em seguida, é feito o levantamento do recurso solar, por meio do site:

<http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=sundata>

Coordenada Geográfica

Latitude	-24.892832	Sul
Longitude	-50.791180	Oeste
Irradiação solar diária média /Horas de Sol Pleno (HSP)	4,49	(kWh/m ² .dia)

Estação: Ipiranga
Município: Ipiranga, PR - BRASIL
Latitude: 24,901° S
Longitude: 50,749° O
Distância do ponto de ref. (24,892832° S; 50,791180° O): 4,4 km

#	Ângulo	Inclinação	Irradiação solar diária média mensal [kWh/m ² .dia]												Média	Delta
			Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez		
<input checked="" type="checkbox"/>	Piano Horizontal	0° N	5,68	5,43	4,91	4,15	3,30	2,91	3,19	4,16	4,32	4,95	5,69	5,90	4,55	2,99
<input checked="" type="checkbox"/>	Ângulo igual a latitude	25° N	5,11	5,18	5,08	4,77	4,15	3,84	4,14	5,03	4,63	4,84	5,19	5,22	4,76	1,38
<input checked="" type="checkbox"/>	Maior média anual	21° N	5,24	5,26	5,10	4,71	4,05	3,72	4,02	4,94	4,62	4,90	5,32	5,37	4,77	1,64
<input checked="" type="checkbox"/>	Maior mínimo mensal	45° N	4,24	4,51	4,72	4,78	4,40	4,18	4,46	5,19	4,43	4,31	4,36	4,27	4,49	1,02

É necessário realizar o cálculo da taxa de desempenho do sistema (TD), adaptando alguns critérios sugeridos pelos projetistas, calculados ou encontradas no datasheet do equipamento.

Sujeira	0,01
Diff entre módulos	0,01
Temperatura	0,14
Efeito Joule	0,01
Eficiência inversor	0,035
MPPT	0,01
Eficiência Total	78,50%

Por último é feito o dimensionamento do Gerador Fotovoltaico, por meio da seguinte equação.

$$P = \frac{\text{Consumo(kWh)}}{\text{HSP} * \text{Eficiência}}$$

Potência de pico do painel fotovoltaico - PFV	54,46	kW
Potência da Placas Escolhida	380	W

A potência da placa é escolhida com base nas potências comerciais disponíveis no mercado. Daí, dividindo a potência de pico do painel fotovoltaico (PFV) pela potência da placa, temos que são necessárias 144 placas.