



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO CEARÁ
IFCE *CAMPUS* FORTALEZA
PÓS-GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIA E GESTÃO AMBIENTAL

BRENA KAROLINE VALENTIM PAIVA

**AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA DE BRIQUETES PRODUZIDOS A PARTIR DA
VALORIZAÇÃO DA BIOMASSA RESIDUAL NO ESTADO DO CEARÁ**

FORTALEZA

2020

BRENA KAROLINE VALENTIM PAIVA

AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA DE BRIQUETES PRODUZIDOS A PARTIR DA
VALORIZAÇÃO DA BIOMASSA RESIDUAL NO ESTADO DO CEARÁ

Dissertação submetida à Coordenação do Programa de Pós-graduação em Tecnologia e Gestão Ambiental do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE) - *Campus* Fortaleza, como requisito para obtenção do Título de Mestre em Tecnologia e Gestão Ambiental. Área de concentração: Instrumentos de Gestão Ambiental.

Orientador: Prof. Titular Adeildo Cabral da Silva.

Coorientador: Prof. Dr. Ricardo Luís Teles de Carvalho.

FORTALEZA

2020

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Instituto Federal do Ceará - IFCE
Sistema de Bibliotecas - SIBI
Ficha catalográfica elaborada pelo SIBI/IFCE, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

PAIVA, BENA KAROLINE VALENTIM.

AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA DE BRIQUETES PRODUZIDOS A PARTIR DA VALORIZAÇÃO DA BIOMASSA RESIDUAL NO ESTADO DO CEARÁ / BENA KAROLINE VALENTIM PAIVA. - 2020.

70 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado) - Instituto Federal do Ceará, Mestrado em Tecnologia e Gestão Ambiental, Campus Fortaleza, 2020.

Orientação: Prof. Dr. ADEILDO CABRAL DA SILVA.

Coorientação: Prof. Dr. RICARDO LUÍS TELES DE CARVALHO.

1. Biomassa residual. 2. Avaliação do ciclo de vida. 3. Briquete. I. Título.

CDD 628



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO CEARÁ
Av. 13 de maio, 2081 , - Bairro Benfica - CEP 60040-531 - Fortaleza - CE - www.ifce.edu.br

AVALIAÇÃO

Processo: 23256.006233/2020-71

Interessado: Coordenadoria do Curso de Mestrado em Tecnologia e Gestão Ambiental
(PGTGA)

FOLHA DE APROVAÇÃO

BRENA KAROLINE VALENTIM PAIVA

AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA DE BRIQUETES PRODUZIDOS A PARTIR DA VALORIZAÇÃO DA BIOMASSA RESIDUAL NO ESTADO DO CEARÁ

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Tecnologia e Gestão Ambiental do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE) - Campus Fortaleza, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Tecnologia e Gestão Ambiental. Área de concentração: Gestão e Saneamento Ambiental.

Aprovada em: 08/06/2020



Documento assinado eletronicamente por **Saulo Rocha Ferreira, Usuário Externo**, em 09/06/2020, às 10:25, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Adeildo Cabral da Silva, Professor do Ensino Básico, Técnico e Tecnológico**, em 11/06/2020, às 14:53, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Marisete Dantas de Aquino, Usuário Externo**, em 20/06/2020, às 15:31, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade do documento pode ser conferida no site https://sei.ifce.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0 informando o código verificador **1730726** e o código CRC **462914BE**.

“O Senhor é o meu pastor; nada me faltará”.

Salmo 23.

AGRADECIMENTOS

A Deus!!!

Obrigada à minha querida e amada mãe e ao meu pai, que contribuíram de todas as formas para eu estar aqui, por serem meu alicerce e minha força maior! Seus ensinamentos foram e sempre serão de fundamental importância na minha vida.

Obrigada ao meu namorado, que sempre esteve presente em todos os momentos!

Obrigada a todos da minha família (avós, tios, tias, primos, primas).

Obrigada especial ao meu orientador, professor Dr. Adeildo Cabral, pela confiança e presteza nestes anos de trabalho! Seus ensinamentos estarão sempre comigo.

Obrigada ao meu coorientador, professor Dr. Ricardo Carvalho, pelos ensinamentos e enorme ajuda, sempre!

Obrigada à FUNCAP pelo apoio financeiro durante a pesquisa.

Obrigada ao Sr. Emanuel Gurgel, que além de contribuir com minha pesquisa, me trouxe ensinamentos que levarei por toda a vida!

Aos amigos da turma 2018.1, especialmente à Nirlania, Ismael, Jéssica e Zillene, meu muito obrigada! Vocês foram peças fundamentais nessa caminhada!

À coordenação do PGTGA e aos demais professores que compartilharam comigo um pouco da enorme sabedoria, muito obrigada!

Obrigada aos amigos do LERCA por todos os momentos compartilhados, em especial ao Gilberto, meu bolsista de pesquisa!

Obrigada aos membros da banca, por aceitarem participar e contribuir com a pesquisa!

A todos que não foram citados aqui, mas que guardo comigo...

Muito obrigada!

RESUMO

As atividades florestais, agrícolas e industriais no Brasil geram grande quantidade de biomassa residual, porém, a maior parte desses resíduos é normalmente descartada em aterros sanitários e/ou lixões, não recebendo destinação ambientalmente sustentável. Dessa maneira, a produção de briquetes de biomassa, um biocombustível sólido, se mostra como uma alternativa tecnológica para o aproveitamento de resíduos, gerados em diversos setores. No Brasil, existem estímulos à implementação da Avaliação do Ciclo de Vida de produtos, sendo esta abordagem uma ferramenta que permite avaliar o impacto ambiental potencial associado a um produto ou serviço durante seu ciclo de vida. Esta pesquisa trata-se de um estudo de caso real que visa avaliar os impactos ambientais da utilização da biomassa residual resultante de processos de poda urbana no ciclo de vida de briquetes produzidos na Região Metropolitana de Fortaleza/CE, realizando uma avaliação comparativa entre o cenário convencional (C0 – briquete produzido a partir de resíduo de serraria) e o cenário alternativo (C1 – briquete produzido a partir da mistura de resíduo de serraria e de poda municipal). A unidade funcional definida foi 1 tonelada de briquete de biomassa produzido, sendo as fronteiras do sistema do berço ao portão da fábrica. A avaliação de ciclo de vida foi realizada com base na NBR ISO 14040:2009, usando o *software* SimaPro e a base dados Ecoinvent. O método utilizado na pesquisa foi o ReCiPe *midpoint*. Na maioria das categorias analisadas, os resultados mostram que o cenário C1 apresenta menos impactos ambientais quando comparado com o cenário C0. A produção de briquetes com a inserção dos resíduos provenientes da poda municipal (C1) apresentou ganhos ambientais em relação ao cenário C0, onde há apenas a utilização de resíduos da serraria. Esse ganho está diretamente relacionado às etapas específicas do ciclo de vida da poda, que reduziu os impactos referentes à produção e transporte das toras de madeira até a serraria.

Palavras-chave: Biomassa residual, Avaliação do ciclo de vida, Briquete.

ABSTRACT

Forestry, agricultural and industrial activities in Brazil generate a large amount of residual biomass, however, most of this waste is normally disposed of in landfills and/or dumps, and does not receive an environmentally sustainable destination. Thus, wood briquettes production, a solid biofuel, shows itself as a technological alternative for the forest residues use, generated in several sectors. In Brazil, there are incentives for the products Life Cycle Assessment implementation, this approach being a tool that allows assessing the potential environmental impact associated with a product or service during its life cycle. This research is a real case study that aims to evaluate the environmental impacts of residual biomass use resulting from urban pruning processes in the life cycle of briquettes produced in the Metropolitan Region of Fortaleza/CE, performing a comparative assessment between the conventional scenario (C0 - briquette produced from sawmill waste) and the alternative scenario (C1 - briquette produced from the sawmill waste and municipal pruning mixture). The defined functional unit was 1 ton of biomass briquette produced, with the system boundaries from the cradle to the factory gate. The life cycle assessment was performed based on the NBR ISO 14040:2009, using the SimaPro software and the Ecoinvent database. The method used in the research was the ReCiPe midpoint. In most of the categories analyzed, the results show that scenario C1 has less environmental impacts when compared to scenario C0. The production of briquettes with the insertion of waste from municipal pruning (C1) showed environmental gains in relation to the C0 scenario, where there is only the sawmill waste use. This gain is directly related to the specific stages of the pruning life cycle, which reduced the impacts related to the production and transportation of wood logs to the sawmill.

Keywords: Residual biomass, Life cycle assessment, Briquette.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 — Matriz Energética Mundial	20
Figura 2 — Matriz Energética Brasileira	21
Figura 3 — Matriz Elétrica Brasileira	21
Figura 4 — Consumo Residencial de Energia	24
Figura 5 — Estrutura da avaliação de ciclo de vida.....	31
Figura 6 — Fluxograma relativo ao processo resultante do acompanhamento da poda urbana, descritivo da ACV desde a produção do recurso até à distribuição do produto final em forma de energia térmica.....	36
Figura 7 — Localização das árvores cortadas.....	37
Figura 8 — Equipe realizando o corte das árvores em Fortaleza.....	37
Figura 9 — Detalhes do processo de pesagem da poda no ASMOC.....	38
Figura 10 — Triturador.....	39
Figura 11 — Picador Vermeer.....	39
Figura 12 — Picador Metalcava.....	39
Figura 13 — Secador rotativo (redução da umidade)	40
Figura 14 — Briquetadeira.....	40
Figura 15 — Briquetes.....	40
Figura 16 — Sistema de produto definido para a produção do briquete de biomassa do C0.....	43
Figura 17 — Sistema de produto definido para a produção do briquete de biomassa do C1.....	44
Figura 18 — Comparativo dos impactos ambientais dos cenários de produção de briquetes C0 e C1	49
Figura 19 — Comparativo dos impactos ambientais relativos à produção da biomassa de resíduos de serraria e ao resíduo de poda municipal (foi considerada a unidade de análise de 1 ton de resíduo)	51
Figura 20 — Análise de contribuição relativa ao resíduo da serraria.....	52
Figura 21 — Análise de contribuição relativa ao resíduo da poda municipal.....	53
Figura 22 — Análise de contribuição do cenário base C0 na cadeia de valor de produção de briquetes (resíduo de serraria)	54

Figura 23 — Análise de contribuição do cenário C1 na cadeia de produção de briquetes (resíduo de serraria + resíduo de poda municipal)	56
---	----

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 — Fronteiras do sistema analisadas em estudos de ACV no âmbito da bioenergia e produção de briquetes e pellets de biomassa.....	35
--	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 — Vantagens dos briquetes como biocombustível.....	26
Tabela 2 — Resultados das previsões de poder calorífico de briquetes produzidos a partir de resíduos.....	27

LISTA DE SIGLAS

ABCV	Associação Brasileira de Ciclo de Vida
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACV	Avaliação do Ciclo de Vida
AICV	Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ASMOC	Aterro Sanitário Metropolitano Oeste de Caucaia
CBCS	Conselho Brasileiro de Construção Sustentável
CE	Ceará
CEE	Companhia de Energia Elétrica
CONAB	Companhia Nacional de Abastecimento
COP 21	21ª Conferência das Partes
EPA	<i>Environmental Protection Agency</i>
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
GEE	Gases de Efeito Estufa
GLP	Gás Liquefeito de Petróleo
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IBICT	Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia
ICV	Inventário do Ciclo de Vida
IEA	<i>International Energy Agency</i>
IFCE	Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia
IPEA	Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada
LERCA	Laboratório de Energias Renováveis e Conforto Ambiental
MMA	Ministério do Meio Ambiente
MME	Ministério de Minas e Energia
MUT	Mudança de Uso da Terra
NBR	Norma Brasileira
ODS	Objetivos do Desenvolvimento Sustentável
PMF	Prefeitura Municipal de Fortaleza
PMFS	Plano de Manejo Florestal Sustentável
PNMC	Política Nacional sobre Mudança do Clima
REPA	<i>Resource and Environmental Profile Analysis</i>

SCSP	Secretaria Municipal da Conservação e Serviços Públicos
SEUMA	Secretaria Municipal de Urbanismo e Meio Ambiente
URBFOR	Autarquia de Urbanismo e Paisagismo de Fortaleza
USEPA	<i>U. S. Environmental Protection Agency</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

® Marca registrada

% Porcentagem

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	16
1.2	Objetivos.....	18
1.2.1	Objetivo Geral.....	18
1.2.2	Objetivos Específicos.....	18
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	19
2.1	Problemática do Estudo de Caso.....	19
2.2	Disponibilidade de Biomassa.....	24
<i>2.2.1</i>	<i>Biomassa no Nordeste do Brasil.....</i>	<i>26</i>
<i>2.2.2</i>	<i>Biomassa em áreas urbanas.....</i>	<i>28</i>
2.3	O Método Aplicado: Avaliação de Ciclo de Vida.....	29
<i>2.3.1</i>	<i>Objetivo e escopo.....</i>	<i>31</i>
<i>2.3.2</i>	<i>Análise de inventário.....</i>	<i>31</i>
<i>2.3.3</i>	<i>Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida.....</i>	<i>32</i>
<i>2.3.4</i>	<i>Interpretação.....</i>	<i>32</i>
<i>2.3.5</i>	<i>Softwares e aplicações.....</i>	<i>32</i>
<i>2.3.6</i>	<i>ACV de biocombustíveis.....</i>	<i>34</i>
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	36
3.1	Acompanhamento da Poda na Rua e Encaminhamento dos Resíduos ao Aterro Sanitário.....	36
3.2	Fábrica de Briquetes.....	38
3.3	Estudo de ACV.....	42
<i>3.3.1</i>	<i>Definição de objetivo e escopo.....</i>	<i>42</i>
<i>3.3.2</i>	<i>Função do produto.....</i>	<i>42</i>
<i>3.3.3</i>	<i>Unidade Funcional.....</i>	<i>42</i>
<i>3.3.4</i>	<i>Fluxo de referência.....</i>	<i>43</i>
<i>3.3.5</i>	<i>Sistema de produto.....</i>	<i>43</i>

3.3.6	<i>Fronteiras</i>	44
3.3.7	<i>Software</i>	46
3.3.8	<i>Métodos de AICV</i>	46
3.3.9	<i>Procedimentos de alocação</i>	47
3.3.10	<i>Tipos de impactos, método de avaliação de impacto e interpretação</i>	47
3.3.11	<i>Requisito de qualidade dos dados</i>	47
3.3.12	<i>Limitações</i>	47
3.4	Inventário do ciclo de vida	48
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	49
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	58
	REFERÊNCIAS	59
	APÊNDICE A — INVENTÁRIO	65

1 INTRODUÇÃO

As atividades florestais, agrícolas e industriais no Brasil produzem grande quantidade de biomassa residual ¹, sendo esta normalmente queimada a céu aberto, depositada inadequadamente no ambiente ou encaminhada para aterros sanitários e/ou lixões. As queimadas a céu aberto e incêndios florestais que ocorrem em diversas partes do Brasil geram emissões significativas de gases de efeito de estufa (GEE), resultando na remoção de carbono dos ecossistemas e degradação dos solos. Tais práticas têm um impacto ambiental significativo em termos de aquecimento global e ecossistemas terrestres, havendo uma necessidade crescente de melhorar os procedimentos de gestão de cargas de biomassa em áreas florestais, agrícolas etc., com vista à gestão da vegetação e valorização da biomassa em diversos contextos. Desta forma, não sendo utilizada de maneira eficiente para algum fim específico como, por exemplo, para a produção de energia renovável, essa biomassa é desperdiçada, ocasionando perda de matéria-prima e energia, e causando emissões para o ar, solo e água.

Nos últimos anos, a gestão integrada e valorização da biomassa residual para a produção de energia renovável passou a ser considerada uma prática alternativa que poderá contribuir para o estabelecimento de sistemas bioeconômicos circulares, incluindo a diversificação da oferta de energia térmica. Neste contexto, estas práticas podem contribuir para uma redução da dependência de combustíveis fósseis, através da produção descentralizada de energia e a geração de valor econômico e social em comunidades locais.

No contexto da produção de energia renovável, a produção endógena de briquetes a partir da densificação da biomassa residual se apresenta como uma alternativa tecnológica para uma gestão e aproveitamento integrados dos resíduos sólidos (CONDIA; SILVA; OMETTO, 2016). Para Santos *et al.* (2015), a produção de briquetes pode ter cunho energético, operacional, logístico e ambiental, substituindo o uso direto da lenha na geração de energia térmica, incluindo o uso residencial e industrial.

De acordo com Pinto (2016), o briquete de biomassa é um combustível de substituição, alternativo aos combustíveis fósseis, que poderá ter um importante desempenho na criação e promoção de sistemas bioeconômicos no Brasil. Neste contexto, a disponibilidade da biomassa

¹ A literatura aponta um valor de aproximadamente 330 milhões de toneladas de biomassa residual gerados no Brasil (PETRICOSKI, 2017).

vem sendo amplamente reconhecida, com seu potencial para fornecer grandes quantidades de energia, resultando numa efetiva mitigação de impactos ambientais.

No Brasil, os dados oficiais sobre a produção e venda de briquetes são escassos, porém, de acordo com uma estimativa feita em 2012, são produzidos aproximadamente 1,2 milhão de toneladas de briquetes por ano, correspondendo a uma taxa de crescimento de demanda de 4,4% ao ano, validando a potencialidade do mercado de energia renovável (DIAS *et al.*, 2012).

Uma das mais importantes vantagens da produção e uso de briquetes é a concentração de energia disponível (considerando que um mesmo volume de briquete pode ter cinco vezes mais energia que a madeira in natura), além de dar destino viável econômica e ambientalmente aos resíduos (FURTADO *et al.*, 2010; PAULA *et al.*, 2011).

Um dos resíduos de biomassa gerado e disponível no Brasil para valorização energética no contexto urbano é a madeira resultante da poda urbana. A poda urbana é um processo importante na manutenção de árvores e jardins e que contribui para fortalecer as coberturas verdes das cidades, favorecendo assim dinâmicas de melhoria do metabolismo urbano. Contudo, ao realizar a poda, os municípios brasileiros geram uma quantidade significativa de biomassa que é comumente encaminhada para aterros sanitários, não passando por qualquer processo de valorização. Neste contexto, de acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2010), a região Nordeste apresenta índice médio de arborização de 61,5%, gerando assim uma considerável quantidade de biomassa residual resultante da gestão e manutenção dessa vegetação, incluindo a poda regular de árvores.

Embora o mercado de briquetes seja novo no Brasil e principalmente no Ceará, é um mercado inovador, pois além de permitir encontrar destino útil para um material que normalmente é encaminhado para os lixões, gera oportunidades de emprego no setor da produção de energia renovável e bioeconomia através da produção de um combustível de elevado valor energético e ambiental, sendo seu potencial de crescimento em termos do mercado de consumo no Ceará relativamente elevado (SILVA, 2015).

Na busca por melhores resultados de desempenho ambiental é necessário procurar estratégias pró-ativas para resolver problemas ambientais, sendo indispensável considerar os impactos ambientais dos combustíveis produzidos, incluindo todas as etapas do ciclo de vida, desde a extração de matérias-primas até à produção do combustível (do berço ao portão) ou até à utilização final do produto e descarte dos resíduos no meio ambiente (do berço ao túmulo).

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) se apresenta como uma importante ferramenta de sistemas de gestão ambiental, visto que discute com clareza e objetividade as questões

ambientais relacionadas ao gerenciamento e uso eficiente de recursos ambientais (HANSEN; SEO; KULAY, 2010).

Diante do exposto, com a realização deste estudo de ACV da produção de briquetes produzidos a partir da biomassa residual no contexto da economia circular no Estado do Ceará, será possível conhecer os pontos críticos de impacto ambiental (*hotspots*) deste sistema de produto, identificando e quantificando a magnitude desses impactos. Além disso, os resultados deste trabalho possibilitarão realizar comparações com outros estudos, com vista à validação dos resultados obtidos na ACV.

1.2 Objetivos

1.2.1 Geral

Este estudo visa avaliar os impactos ambientais da utilização da biomassa residual resultante de processos de poda urbana no ciclo de vida de briquetes produzidos na região de Fortaleza/CE.

1.2.2 Específicos

- Caracterizar o processo de produção de briquetes;
- Caracterizar o processo de poda urbana realizada na cidade de Fortaleza/CE;
- Inventariar os fluxos mássicos e energéticos das produções de briquetes e podas urbanas na cidade de Fortaleza/CE;
- Comparar os impactos ambientais do ciclo de vida da produção convencional de briquetes com a produção utilizando biomassa residual proveniente das podas urbanas na cidade de Fortaleza/CE.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Problemática do Estudo de Caso

Os problemas ambientais, sociais e econômicos relacionados com a questão da segurança energética e recursos naturais associados ao uso de combustíveis fósseis têm sido alvo de discussão por parte da comunidade científica e no âmbito das conferências globais do clima, visto que mais de 2/3 das emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) estão associadas à produção de energia e clima, através do uso deste tipo de combustíveis (NUNES *et al.*, 2017).

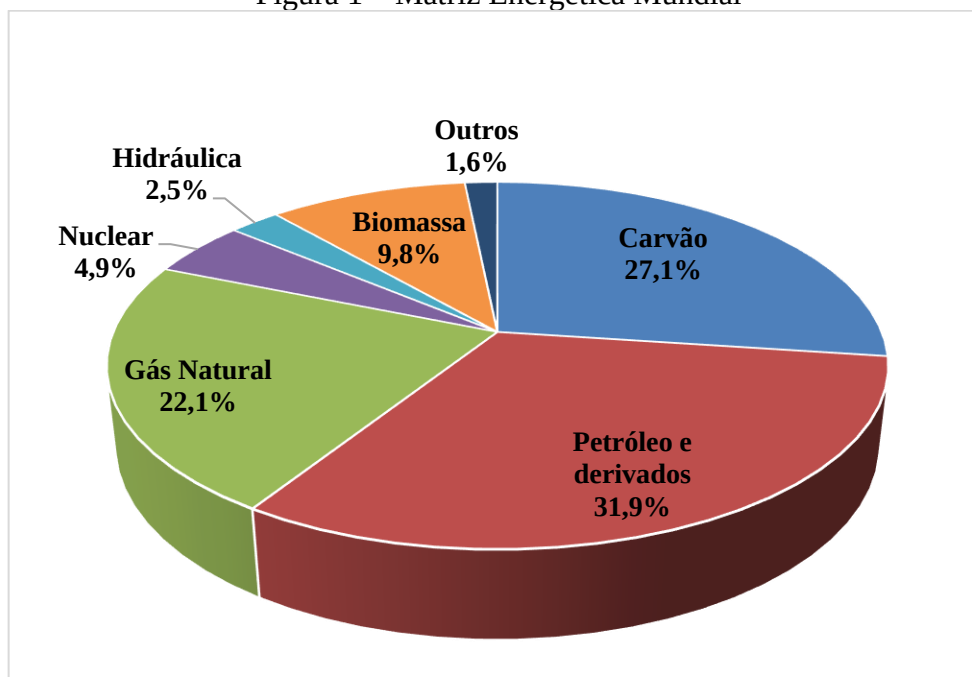
Por outro lado, a demanda mundial e o acesso à energia estão intimamente ligados ao desenvolvimento socioeconômico e à melhoria na qualidade de vida da população, sendo um dos aspectos principais tratados no acordo sobre a mudança do clima. No contexto do crescimento da economia global e particularmente das economias emergentes, estima-se um aumento significativo no crescimento das necessidades energéticas a nível global, tema central nas negociações decorridas no âmbito da 21ª Conferência das Partes (COP 21) da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas, que aconteceu em Paris.

O respectivo acordo de Paris objetiva fortalecer resposta global à ameaça da mudança do clima, tendo sido aprovado por 195 países, visando reduzir as emissões de gases de efeito estufa no contexto do desenvolvimento sustentável. Para cumprir o acordo, os governos se responsabilizaram por construir seus compromissos apresentando suas contribuições de redução de emissões dos gases de efeito estufa nas próximas décadas. O Brasil, por exemplo, se comprometeu em reduzir até 2030 as emissões de GEE em 43% com relação aos níveis de 2005. Para alcançar o compromisso firmado, o país deve incluir a penetração de sistemas bioenergéticos sustentáveis em sua atual matriz energética, com vista a alcançar 45% de energias renováveis na composição da matriz energética em 2030.

Ainda nesse contexto, os Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS) tratam sobre a questão climática e acesso à energia limpa, por exemplo: o objetivo 7º traz em sua abordagem o aumento, até 2030, da participação de energias renováveis na matriz energética global; enquanto o objetivo 13º propõe medidas urgentes para combater a mudança climática e seus impactos.

Conforme a *International Energy Agency* – IEA (2018), a matriz energética mundial é composta, principalmente, por fontes não renováveis como o petróleo, carvão e gás natural (aproximadamente 80%), enquanto as fontes renováveis (solar, eólica e geotérmica) juntas correspondem apenas a 1,60%, assinaladas como “outros”, conforme ilustra a Figura 1.

Figura 1 – Matriz Energética Mundial

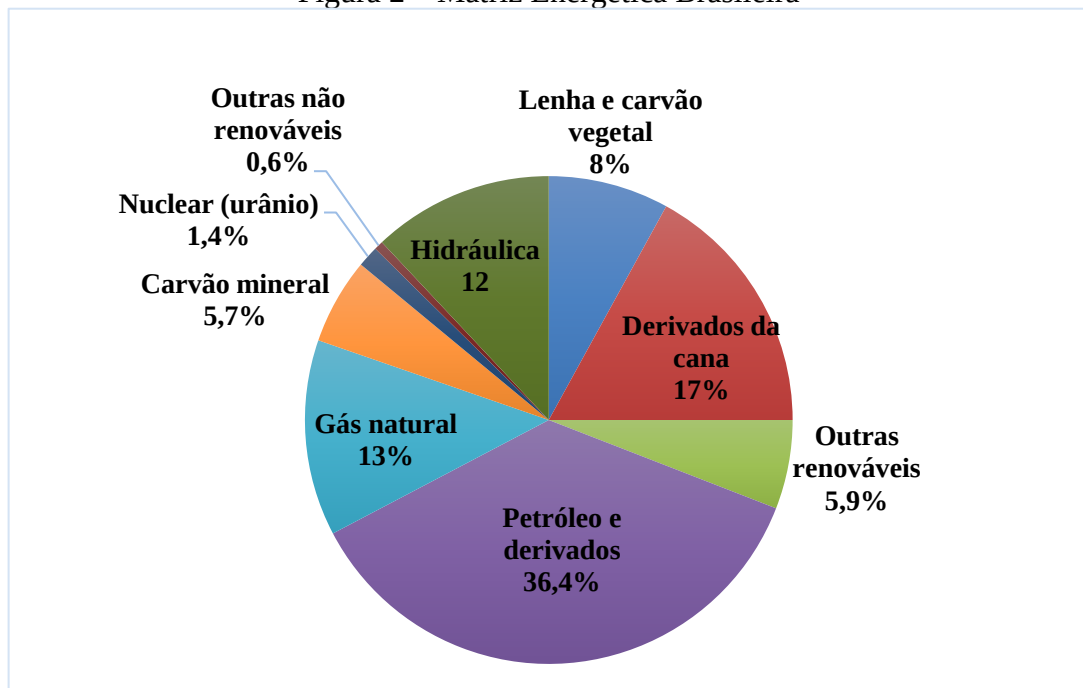


Fonte: Adaptado de IEA (2018).

No Brasil, a matriz energética é composta por fontes renováveis (biomassa, hídrica, solar e eólica) e não renováveis (carvão mineral, urânio, petróleo). O Brasil detém a matriz energética mais renovável do mundo industrializado, com aproximadamente 45% de sua produção proveniente de fontes tais como recursos hídricos, biomassa e etanol, além da energia eólica e solar (GOVERNO DO BRASIL, 2010). Contudo, é ainda controverso o uso de certos tipos de energia renovável, devido aos potenciais impactos ambientais e sociais de alguns tipos de energia renovável. A energia hídrica, por exemplo, tem associados diversos impactos ambientais ao nível dos ecossistemas terrestres e aquáticos, podendo alterar o curso dos rios e sua biodiversidade, bem como impactos adversos sobre comunidades ribeirinhas que habitam junto às usinas hidroelétricas. No caso da biomassa, é importante considerar a disponibilidade de recursos e as mudanças ao nível do uso do solo, que poderão estar associadas à produção de biomassa. No entanto, o uso de biomassa residual é hoje considerado como uma das alternativas energéticas mais viáveis na promoção da economia circular e geração de valor a nível de comunidades locais.

Conforme a Empresa de Pesquisa Energética - EPE (2018a), a matriz energética brasileira se diferencia da mundial por apresentar considerável participação das fontes de energias renováveis (em torno de 42,9%). A Figura 2 demonstra esse percentual para o ano de 2017.

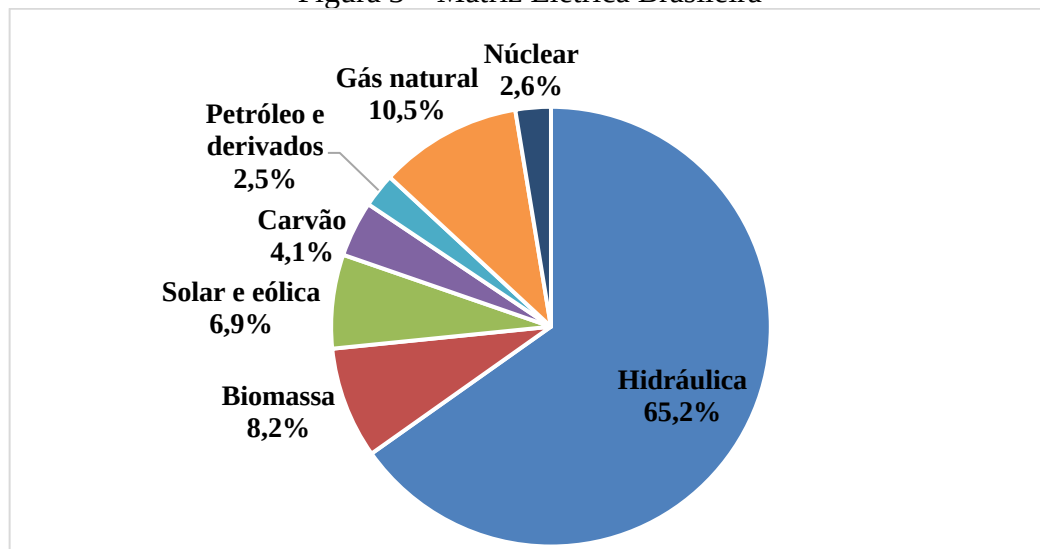
Figura 2 – Matriz Energética Brasileira



Fonte: Adaptado de EPE (2018a).

Segundo a EPE (2018a) a matriz elétrica² brasileira é ainda mais renovável do que a energética, tal resultado é fruto de o alto índice de energia elétrica gerada advir de usinas hidrelétricas. A maior parte da eletricidade gerada no Brasil advém das usinas hidrelétricas, que responde a aproximadamente 65% da oferta de energia (EPE, 2018B), conforme Figura 3.

Figura 3 – Matriz Elétrica Brasileira



Fonte: Adaptado de EPE (2018b).

² A matriz elétrica é formada pelo conjunto de fontes disponíveis apenas para a geração de energia elétrica, ou seja, a matriz elétrica é parte da matriz energética.

A Usina Hidrelétrica de Itaipu Binacional é uma das maiores do Brasil, localizada no Rio Paraná (fronteira entre Brasil e Paraguai), gera cerca de 17% de toda a energia elétrica consumida no Brasil e 75% do consumo paraguaio (MOREIRA, 2014). Inaugurada em 2016, a Usina Hidrelétrica de Belo Monte, localizada no Rio Xingu (município de Altamira, sudoeste do Pará), é a maior usina 100% nacional, com capacidade para atender 60 milhões de pessoas, correspondendo a cerca de 40% do consumo residencial do país (GOVERNO DO BRASIL, 2016).

Embora o Brasil possua as maiores reservas de água do planeta, correspondendo a aproximadamente 12% da água doce superficial existente no mundo, vale ressaltar que elas estão desigualmente distribuídas no espaço geográfico brasileiro, considerando também que esse vasto potencial não é represado por completo para hidrelétricas (ARAÚJO, 2016).

A forte ligação entre a geração de energia e o sistema hídrico, ou seja, a dependência das usinas hidrelétricas, causa sérios problemas no setor elétrico, em períodos de estiagem, por exemplo, esse setor fica completamente comprometido.

No ano de 2001, o Brasil passou por um forte período de crise hídrica com níveis baixíssimos de água nos reservatórios, um longo período de seca (inclusive em épocas do ano em que os reservatórios costumavam estar bem cheios) aliado também a uma gestão ineficiente dos recursos naturais. Com isso, ocorreu um forte desequilíbrio entre a oferta e a demanda de energia elétrica, que ficou conhecido como Crise do Apagão (GOMES, 2007; ARAÚJO, 2016).

Diante desse cenário, para Pacheco (2016), é de fundamental importância rever a composição da matriz energética brasileira, bem como a necessidade de transformar energia elétrica através de outras fontes primárias e autossustentáveis de energia, de modo a aproveitar todos os recursos disponíveis no país.

Segundo Lima Júnior *et al.* (2014), o uso de combustíveis fósseis poderia ser substituído pela utilização de fontes renováveis de energia. Conforme os autores, as fontes de biomassa poderiam ter uma maior participação na matriz energética substituindo os combustíveis fósseis, inclusive no acionamento das termelétricas (que ao serem acionadas, principalmente em períodos de estiagens, recorrem ao uso de combustíveis fósseis).

De acordo com Vale *et al.* (2007), os resíduos de origem florestal e agrícola constituem uma categoria interessante de biomassa que pode ser explorada. As cascas dos grãos de café e as serragens de madeiras no Brasil, por exemplo, consistem em resíduos de baixo custo, renováveis, não sendo muitas vezes aproveitados de forma útil e sustentável. Tais resíduos são ambientalmente corretos e potencialmente capazes de gerar calor, vapor e energia elétrica,

podendo dessa forma contribuir para a criação de uma matriz energética mais limpa, através da introdução de combustíveis alternativos em processos de geração de energia.

Conforme Flores e Nolasco (2018) do ponto de vista energético, biomassa é toda e qualquer matéria orgânica (seja de origem animal ou vegetal) que pode ser utilizada na produção de energia (mecânica, térmica ou elétrica). Uma das principais vantagens da biomassa é seu aproveitamento endógeno e local através da combustão direta em fornos, caldeiras, fogões residenciais etc.

Numa perspectiva de pensamento de ciclo de vida, os processos de uso de combustíveis fósseis causam não só impactos ambientais diretos associados às emissões de CO₂ (gás carbônico) e outros GEE resultantes de processos de combustão, mas também impactos indiretos associados à extração e transporte de matérias primas e combustíveis. Para Dias *et al.* (2012), quanto à questão ambiental, é imperioso diminuir o uso de combustíveis fósseis na geração de energia por conta das emissões de gases do efeito estufa.

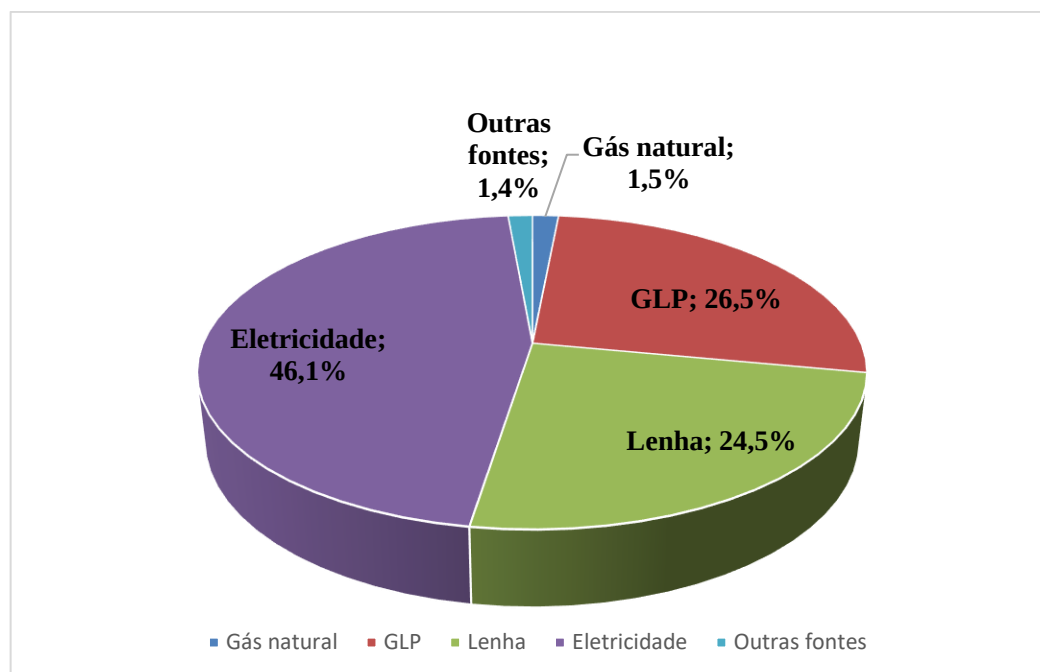
O primeiro grande esforço que visou mitigar as emissões de GEE em escala global foi concretizado pelo Protocolo de Kyoto, discutido e negociado no Japão em 1997, entrou em vigor em fevereiro de 2005, e constitui-se em um compromisso no qual os países industrializados e desenvolvidos tinham a obrigação de reduzir a quantidade de gases poluentes em pelo menos 5% até 2012 (ANDRADE; COSTA, 2008).

No Brasil, a Política Nacional sobre Mudança do Clima (PNMC) – Lei Federal 12.187/2009, compromete-se em reduzir entre 36,1% e 38,9% as emissões de GEE até 2020 (BRASIL, 2009).

Conforme o Ministério de Minas e Energia - MME (2018) existe uma heterogeneidade no perfil de consumo residencial de energia das famílias brasileiras. Famílias de renda mais alta aumentaram o consumo de fontes “modernas” (Gás Liquefeito de Petróleo - GLP - e eletricidade), enquanto as famílias de baixa renda, principalmente em áreas rurais, ainda são dependentes da biomassa tradicional.

De acordo com a EPE (2018a) o consumo residencial de eletricidade no Brasil para o ano de 2017 ficou em aproximadamente 46%, enquanto o consumo de lenha neste mesmo setor foi em torno de 24%, ilustrados na Figura abaixo.

Figura 4 – Consumo Residencial de Energia - 2017



Fonte: Adaptado de EPE (2018a).

Estudos têm sido realizados em diversas partes do mundo comprovando que a queima de lenha em ambiente domiciliar é um fator de risco ambiental cujos efeitos na qualidade do ar interno e saúde podem ser severos e contribuir para a incidência de doenças respiratórias e cardiovasculares, ou até mesmo a morte prematura de indivíduos mais expostos a contaminantes provenientes da combustão ineficiente de lenha (GIODA; LEON, 2017). Neste contexto, a queima de lenha em um fogão rústico corresponde a 400 cigarros por hora. Um estudo realizado por Lyra *et al.* (2015) apontou que, na região Nordeste, se concentra o maior número de fogões à lenha (42% do total do país). Nesta região a principal fonte de lenha é a caatinga que representa quase 50% da energia primária. Cerca de 80% da lenha retirada deste bioma é utilizada como fonte de energia, sendo a principal causa de desmatamento.

Neste contexto, a literatura global aponta que diversas organizações a nível internacional e nacional têm vindo a promover a integração de soluções de custo razoavelmente baixo para minimizar tais efeitos. Uma destas alternativas está associada ao uso de combustíveis a biomassa melhorados, resultantes da densificação da biomassa residual, sendo a combustão eficiente de briquetes uma tecnologia de baixo custo que poderá criar valor ao nível das economias locais.

2.2 Disponibilidade de Biomassa

A biomassa é uma das fontes para produção de energia que apresenta maior potencial de crescimento nos próximos anos. Considerada uma das alternativas fundamentais para a

diversificação da matriz energética, tanto no mercado interno como no internacional, possui capacidade de redução da dependência de combustíveis fósseis (Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, 2008).

Há mais de uma década já era previsto que no cenário futuro haveriam muitas vantagens em produzir energia a partir da biomassa, principalmente quando as fontes de energias renováveis se tornassem competitivas em relação aos combustíveis fósseis, uma estimativa feita pelos autores para o ano de 2020 (GENOVESE; UDAETA; GALVÃO, 2006).

Segundo o Ministério do Meio Ambiente - MMA (2018), a demanda de biomassa pode ser dividida em dois tipos, a saber: não-energética e energética. A demanda energética consiste no consumo para gerar calor por meio da combustão e nela se incluem três setores consumidores, nomeadamente o domiciliar, o industrial e o comercial. Já a não-energética pode ser considerada aquela que é utilizada no contexto da bioeconomia emergente, incluindo aplicações associadas à fabricação de produtos inovadores como biomateriais, cosméticos, bioplásticos etc., produtos estes que podem vir a substituir bens produzidos a partir de combustíveis fósseis.

Embora de difícil contabilização, uma estimativa da quantidade de biomassa existente à escala global apresentou valor na ordem de 1,8 trilhão de toneladas (ANEEL, 2008). No Brasil existem excelentes condições para a produção e o uso energético da biomassa residual em larga escala, aliado a três importantes fatores: grande extensão de terras agrícolas e floresta com cargas significativas de biomassa em excesso, além de espécies invasoras que devem ser geridas de forma adequada para, por exemplo, gestão de resíduos agrícolas, prevenção de incêndios e redução de impactos ambientais na biodiversidade. Uma estimativa apresentou valores na ordem de aproximadamente 330 milhões de toneladas de biomassa residual gerados no Brasil (PETRISCOKI, 2017).

Embora o Brasil disponha de vastas reservas energéticas de biomassa residual, para Bley Júnior *et al.* (2009), esse potencial poderia ser explorado de forma mais eficiente, auxiliando de forma favorável a promoção do desenvolvimento rural e da sustentabilidade local das populações, além de gerar novas oportunidades de emprego e renda.

Uma das maiores fontes de matéria orgânica no Brasil é o bagaço da cana-de-açúcar, possuindo esta reserva destaque na geração de energia devido à qualidade e adequabilidade das suas propriedades físicas e químicas para conversão termoquímica. Dentre as fontes de biomassa, a cana de açúcar é uma das mais utilizadas e atualmente representa 78,23% do quantitativo de biomassa total utilizado no Brasil (COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO – CONAB, 2017; NUNES *et al.*, 2017).

Dentre os diversos tipos de biomassa disponíveis para inserção na produção de briquetes, a literatura traz algumas das inúmeras vantagens do uso desse biocombustível, tais como as enunciadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Vantagens dos briquetes como biocombustível

VANTAGENS
Alto poder calorífico (4000 – 4800 kcal/kg)
Redução no volume de estocagem e transporte
Menos poluição, com mais energia
Baixo teor de cinzas

Fonte: Adaptado de Andrade (2017).

2.2.1. Biomassa no Nordeste do Brasil

De acordo com o MMA (2018), a região Nordeste encontra-se numa situação de privilégio em termos de potencial de biomassa, tanto de fontes cultivadas (como cana-de-açúcar, eucalipto, soja) como de fontes nativas (recursos florestais do bioma Caatinga e Cerrado)³. Atualmente, a biomassa nessa região tem significativa participação como fonte de energia primária no processamento de minerais metálicos e não metálicos, alimentos e bebidas, açúcar e álcool, e atividades do setor industrial, além de uma parcela significativa do setor domiciliar ser oriunda dela.

Após uma pesquisa de quantificação e potencial de biomassa presente na região Nordeste, foram também constatados consideráveis índices de resíduos de casca de arroz com potencial de valorização energética, bem como de casca da castanha do caju e de coco, e resíduos da silvicultura, matéria prima esta que pode ser utilizada de forma sustentável na produção de briquetes (LIMA JÚNIOR *et al.*, 2014).

Para Ferreira *et al.* (2016), o reaproveitamento da fibra do coco como biomassa para a geração de energia a partir de sua combustão traz diversas vantagens como o baixo custo, a

³ Pode ser obtida através de corte autorizado em Planos de Manejo Florestal Sustentável (PMFS), sem mudança de uso da terra (MUT) e outros (MMA, 2018).

emissão reduzida de GEE e material particulado, o baixo teor de cinzas quando compactado e, por ser uma energia renovável, o uso deste tipo de biomassa contribui para a diminuição do efeito estufa e do aquecimento global.

Um estudo sobre a quantificação da biomassa a partir do eucalipto na região Nordeste, apontou valores na faixa de $12,15 \times 10^6$ toneladas de matéria seca, localizados principalmente nos estados da Bahia e Piauí, com participação de 93% e 5%, respectivamente (MMA, 2018).

Outra espécie encontrada no Nordeste é a algaroba, espécie exótica (portanto, não há restrições legais para a sua exploração), presente principalmente em regiões semiáridas e muito utilizada na produção forrageira e madeireira. Devido ao seu tamanho e densidade, é muito adequada para o uso energético. Com relação à disponibilidade, conforme o mapeamento realizado, a espécie foi encontrada em 3 estados (Rio Grande do Norte, Paraíba e Pernambuco), apresentando disponibilidade de biomassa entre 1,0 a $1,5 \times 10^6$ toneladas de matéria seca por ano (MMA, 2018).

Na região Nordeste, três estados se destacam nas estimativas de biomassa disponível e explorável nos plantios do cajueiro, o Ceará possui 378.094 hectares de área plantada, o Rio Grande do Norte apresenta 107.020 ha, e o Piauí 92.338 ha; o aproveitamento racional da espécie é uma utilidade viável para a fabricação de briquetes, e apresenta poder calorífico inferior das podas de aproximadamente 2500 kcal/kg (GINANI, 2013).

Na literatura foi possível encontrar diversos exemplos de resíduos utilizados para a fabricação de briquetes, conforme descrito na Tabela abaixo:

Tabela 2 – Resultados das previsões de poder calorífico de briquetes produzidos a partir de resíduos

Autor/ano	Estado	Material/Resíduos	Poder calorífico
Oshiro (2016)	Paraná	Maravalha de madeira	23371,73 kJ/kg
Amorim <i>et al.</i> (2015)	Piauí	Ipê Roxo	4666,00 cal/g
Freitas <i>et al.</i> (2016)	Pará	Paricá	3787,90 kcal/kg
Santos <i>et al.</i> (2011)	Rio Grande do Norte	Jurema-preta	4800,00 kcal/kg
		Mororó	4600,00 kcal/kg

		Marmeleiro	4650,00 kcal/kg
Pereira (2015)	Pernambuco	<i>Moringa oleífera</i>	23,31 MJ/kg

Fonte: Autora (2020).

Conforme Zago *et al.* (2010), alguns resíduos oriundos de processos produtivos das indústrias madeireiras (exemplo: pó de serragem, maravalhas, cavacos de madeira etc.) também fazem parte da matéria-prima utilizada para a produção de briquetes.

2.2.2 Biomassa em áreas urbanas

Outra fonte que apresenta importante potencial para a produção de energia renovável são os resíduos de biomassa lenhosa resultantes de podas urbanas, que servem de insumo para a fabricação de biocombustíveis sólidos, a exemplo dos briquetes, para fins energéticos.

No município de Fortaleza/Ceará, estima-se que a capacidade de produção de madeira resultante das podas no ano de 2008⁴ foi da ordem de 33.177 toneladas, tendo como destino final o Aterro Sanitário Metropolitano Oeste de Caucaia - ASMOC (CORTEZ, 2011). O valor mencionado demonstra o desperdício de recursos oriundos da poda urbana, visto que estes poderiam ser objeto de valorização com vista à geração de energia térmica, ao invés de serem encaminhados para o aterro sanitário.

Em Lavras da Mangabeira/Ceará, a pesquisa de Andrade (2017) mostrou a viabilidade econômica, ambiental e social do funcionamento de uma fábrica de briquetes. No aspecto ambiental, cerca de 200 toneladas/mês de podas de árvores do município em estudo e de localidades vizinhas deixaram de ser encaminhadas para os lixões/aterros sanitários e passaram a ser reaproveitadas; no viés econômico e social, resultados positivos foram obtidos, mostrando crescimento na geração de emprego e renda (direta e indiretamente) contribuindo para o desenvolvimento local no contexto de um amplo mercado consumidor.

No município de Palmas/Tocantins, Rodrigues *et al.* (2016) realizou um levantamento sobre a situação e destinação final dos resíduos oriundos da poda. Neste trabalho foi realizada a análise da viabilidade técnico-econômica destes resíduos para usinas de briquetagem, onde a geração observada destes resíduos de biomassa foi em torno de 23 toneladas/dia, apresentando viabilidade na produção e comercialização de briquetes produzidos a partir desses resíduos.

⁴ Informação mais recente encontrada na literatura para a cidade de Fortaleza/CE.

Em João Pessoa/Paraíba, um estudo realizado por Araújo (2017) acerca dos resíduos da arborização urbana da cidade concluiu que aproximadamente 27 mil toneladas de resíduos foram coletadas no ano de 2008. Foi possível perceber ainda que o quantitativo gerado não apresentou cenário de reutilização.

Conforme Zago *et al.* (2010), alguns resíduos oriundos de processos produtivos das indústrias madeireiras, por exemplo, pó de serragem, maravalhas, cavacos de madeira etc., também fazem parte da matéria-prima utilizada para a produção de briquetes.

2.3 O Método Aplicado: Avaliação de Ciclo de Vida

Em virtude da crescente conscientização com relação à proteção ambiental e os possíveis impactos associados aos produtos (bens e serviços), surgiu a ACV, que teve sua origem histórica marcada na busca por uma técnica adequada para a comparação de desempenho ambiental de produtos (UDO DE HAES *et al.*, 2004), e visa uma abordagem holística de avaliação ambiental ao longo de todo o ciclo de vida de um produto ou serviço.

Os primeiros estudos de ACV tiveram início na década de 60, emergindo durante o período da crise do petróleo, quando também foram levantados diversos questionamentos pela comunidade científica e a sociedade civil sobre o limite da extração dos recursos naturais, especialmente de combustíveis fósseis e de recursos minerais (COLTRO, 2007; BARBOSA JÚNIOR *et al.*, 2008). Desta forma, a ACV vem sendo utilizada no estudo de impactos ambientais de sistemas de produtos convencionais como combustíveis fósseis, e na avaliação de combustíveis alternativos como a biomassa.

Em termos históricos e de acordo com o Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia – IBICT (2015), os primeiros estudos de ACV foram realizados em contexto empresarial para a empresa Coca-Cola. O primeiro estudo da multinacional Norte-americana foi realizado no ano de 1965, a fim de identificar qual embalagem para refrigerantes com o menor impacto ambiental em termos de emissões de GEE, e qual a que utilizaria menos recursos em sua fabricação. O trabalho foi baseado num inventário de matérias-primas e combustíveis utilizados, além das cargas ambientais do processo produtivo de cada embalagem e ficou conhecido como *Resource and Environmental Profile Analysis* (REPA), os resultados serviram de base para a criação e desenvolvimento da ACV.

Em 1974, a empresa Norte-americana aprimorou o trabalho com a realização de um outro estudo, encomendado pela *U. S. Environmental Protection Agency* (USEPA), com objetivo de comparar diferentes embalagens de cervejas. Encarada como a mais ambiciosa

REPA já realizada até então, visto que foi considerado as interconexões com as fases de distribuição e uso, e a cadeia produtiva de diversos materiais como o alumínio, o vidro e o plástico. A literatura aponta este estudo como o marco inicial para o que hoje se conhece por ACV (SILVA, 2012).

De forma geral, e de acordo com a *Environmental Protection Agency* – EPA (1993), o conceito de ACV pode ser compreendido como uma ferramenta para avaliar as consequências ambientais de um produto ou atividade, de forma holística, ao longo de toda a sua vida. Ometto e Tachard (2008) definem como um método que inclui a análise de fluxos de materiais, energia, químicos, água e impactos ambientais associados a cada etapa de um bem ou serviço. A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) por meio da Norma Brasileira (NBR) ISO 14040 define como sendo a avaliação e compilação de entradas, saídas e de impactos ambientais potenciais de um sistema de produto ao longo do seu ciclo de vida.

Diante do exposto, o conceito de ciclo de vida pode ser exemplificado em cinco categorias, a saber: i) extração da matéria-prima; ii) manufatura do produto; iii) embalagem e distribuição; iv) uso; v) disposição (incluindo o reuso, reciclagem, recuperação, incineração ou disposição em aterro sanitário).

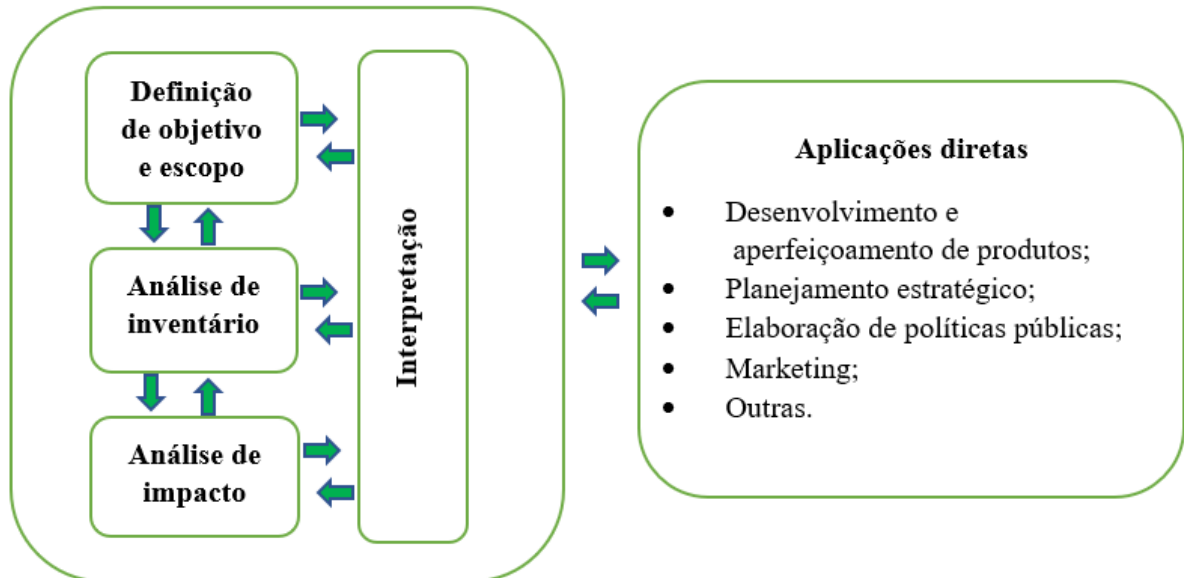
Dentre os principais objetivos da ACV, está a melhoria do desempenho ambiental de processos produtivos e o auxílio na criação de produtos mais sustentáveis (ecodesign⁵).

Em virtude da importância da contribuição da ACV no desenvolvimento de processos e produtos mais eficientes e sustentáveis, o Comitê Brasileiro de Gestão Ambiental da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT)/ CB 38 iniciou no ano 2000 a tradução das normas da série NBR ISO 14040, além de apoiar a criação da Associação Brasileira de Ciclo de Vida – ABCV (BARBOSA JÚNIOR *et al.*, 2008).

Um estudo de ACV deve incluir a definição de objetivo e escopo, análise de inventário, avaliação de impactos e interpretação de resultados, conforme ilustrado na Figura 5.

⁵ Pode ser entendido como a integração de aspectos ambientais no desenvolvimento de produtos, considerando os pontos que apresentam maior potencial de impacto ao meio ambiente no ciclo de vida.

Figura 5 – Estrutura da avaliação de ciclo de vida



Fonte: Adaptado de NBR ISO 14040 (2009).

2.3.1. *Objetivo e escopo*

A etapa de Definição de Objetivo e Escopo é a primeira fase para a realização de uma ACV e visa, primeiramente, definir o objetivo do estudo, declarando as razões para a aplicação do estudo e o público-alvo (ABNT, 2009).

Para Bueno e Rossignolo (2016), a definição de objetivo e escopo é uma etapa que consiste em descrever o sistema do produto a ser estudado, incluindo o estabelecimento das suas fronteiras, e apresentando o propósito e a extensão do estudo. Nesta etapa é importante definir a função do sistema, a unidade funcional, o fluxo de referência e as fronteiras do sistema (OMETTO; TACHARD, 2008).

2.3.2. *Análise de inventário*

A etapa de Análise de Inventário do Ciclo de Vida (ICV) compreende a coleta de dados necessários para o estudo em questão e quantifica os fluxos de entrada e saída de materiais e energia durante o ciclo de vida do produto (ABNT, 2009). Das quatro fases que integram a metodologia de ACV, o levantamento do ICV é uma das fases de maior complexidade, pois necessita de maiores níveis de tempo e de recursos capitais, humanos e financeiros; a montagem de questionários ou roteiros (folhas de coleta de dados) é imprescindível para auxiliar nesta etapa (SILVA, 2012).

Conforme o Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada – IPEA (2016), o inventário de ciclo de vida é dependente de um banco de dados robusto com base em informações sobre insumos e resíduos da produção, seus fluxos de massa e energia e seus impactos ambientais.

2.3.3 Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida

A etapa de Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (AICV) é a terceira fase da ACV e conforme a ABNT (2009), objetiva o entendimento e a avaliação da relevância e significância dos impactos ambientais de um sistema de produto durante seu ciclo de vida. Em outras palavras, na AICV acontece uma espécie de “tradução” dos resultados do ICV para impactos ambientais (através de métodos científicos de avaliação de impactos desenvolvidos).

2.3.4. Interpretação

A Interpretação é a fase final da ACV, neste momento acontece a análise dos resultados obtidos no inventário e na avaliação de impactos, servindo como base para conclusões, recomendações e tomada de decisão conforme a definição de objetivo e escopo para o estudo (ABNT, 2009). Alguns elementos básicos na etapa de interpretação são a identificação de questões relevantes (*hotspots*) para os resultados do ICV e AICV, avaliação do estudo considerando completeza, sensibilidade, consistência e ainda, conclusões, limitações e recomendações.

2.3.5 Softwares e aplicações

Devido à complexidade dos estudos de ACV, existem *softwares* específicos que são utilizados para auxiliar na gestão operacional dos estudos, pois estes integram bases de dados robustas que integram um vasto conjunto de dados a utilizar na análise.

Segundo Santos e Fernandes (2012) alguns dos principais *softwares* encontrados no mercado são: *Boustead Model 5.0*, *Earthster*, *ECOBILAN*, *EIOLCA calculator*, *GaBi 4 LCA software*, *Open LCA*, *SimaPro®*, *Umberto LCA software*.

O *SimaPro®*, software a ser utilizado nessa pesquisa, foi lançado⁶ em 1990 e desenvolvido pela empresa PRé Consultants. É uma ferramenta utilizada para coletar dados e analisar o desempenho ambiental de produtos e serviços. Esta ferramenta pode ser utilizada

⁶ Disponível em: <https://www.acvbrasil.com.br/software/simapro>. Acesso em: 31 maio 2019.

para cálculo da pegada de carbono, design de produto e design ecológico, impacto ambiental de produtos ou serviços e relatórios ambientais (LASSIO, 2013).

As categorias mais comuns em um estudo de ACV são: esgotamento de recursos abióticos, aquecimento global, destruição da camada de ozônio, toxicidade humana, toxicidade em meio aquático, acidificação e eutrofização (CONSELHO BRASILEIRO DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL – CBCS, 2014).

A ACV pode dar auxílio em políticas públicas contribuindo para a formação de critérios e requisitos de sustentabilidade, além de fornecer base científica para que se implemente normas e regulações ambientais.

Alguns países já mantêm o uso de ACV em suas políticas públicas, a saber: na Alemanha é utilizada para orientar cotas obrigatórias de reuso e reciclagem; no México, Peru e Chile seu uso é obrigatório na legislação de biocombustíveis; na França orienta as certificações da Lei Le Grenelle⁷ para todos os produtos industrializados (IPEA, 2016). A lei norte-americana exige a ACV para assegurar que os biocombustíveis tenham 20% a menos de emissões (BARDELLINE, 2011).

No Brasil, no ano de 2002, a ACV passou a ser tratada institucionalmente através da criação da Associação Brasileira de Ciclo de Vida - ABCV. A referida Associação⁸ busca fomentar a ACV nos diversos setores de interesse, tais como: indústrias, centros de ensino e pesquisa, além do governo.

Em 2003, outra importante instituição do país, o IBICT, passou a incorporar a ACV como uma de suas linhas temáticas, focando em ações para o desenvolvimento de bases de dados nacionais.

O Brasil, embora tenha uma matriz energética considerada limpa e um nível tecnológico avançado em muitas cadeias produtivas, com produtos competitivos no mercado internacional, pode não ter suas cadeias produtivas bem avaliadas do ponto de vista do desempenho ambiental se comparado com outros países e regiões (IPEA, 2016).

Para Alem *et al.* (2015), os resultados obtidos a partir da ACV representam um importante diagnóstico que pode dar suporte a políticas organizacionais de compra, iniciativas de rotulagem para orientação do cidadão e encaminhamento de melhorias de processos produtivos menos agressivos ao meio ambiente.

⁷ Consiste em uma metodologia de abordagem de ciclo de vida, primeiramente, aplicado ao setor alimentar e, depois, expandido a todos os setores da indústria francesa.

⁸ Disponível em: http://abcvbrasil.org.br/?p=texto.php&c=quem_somos. Acesso em: 09 de mar. 2019.

Para Barbosa Júnior *et al.* (2008) existe ainda uma grande dificuldade na aplicação da metodologia da ACV em razão da sua complexidade e da necessidade de dados detalhados dos sistemas de produção adequados a cada contexto local.

2.3.6 ACV de biocombustíveis

Condia, Silva e Ometto (2016) realizaram um estudo de ACV para a produção de briquetes feitos a partir da serragem de madeira (oriundos da indústria de beneficiamento primário da madeira). O estudo permitiu identificar os principais aspectos ambientais no ciclo de vida do produto, no caso: o consumo de materiais durante a manufatura dos briquetes, as emissões de GEE durante o uso do produto e nas atividades de transporte. Também foi possível verificar, após a comparação dos briquetes com o carvão vegetal, que as emissões de GEE para a produção e uso dos briquetes foram menores do que o uso de carvão vegetal.

Um estudo de ACV para a produção de pellets de madeira considerou os estágios de produção da matéria-prima até a fabricação do produto dentro da empresa, utilizando o software openLCA. Um dos maiores impactos causados com a produção dos pellets foi no uso do solo e a geração de calor pela caldeira, responsável pela secagem dos resíduos de madeira que chegam com teor de umidade acima do desejado, sendo que tais processos contribuem para as categorias: aquecimento global, danos à saúde humana, toxicidade e ecotoxicidade (SFEIR, 2013).

Na pesquisa de Alanya-Rosenbaum e Bergman (2019) envolvendo um estudo de ACV do berço ao túmulo para briquetes não perfurados e briquetes torreficados, os resultados mostraram uma diminuição notável no impacto do aquecimento global ao substituir combustíveis fósseis por esses dois produtos biológicos. A análise da pegada com recursos mostrou que a maior parte da extração de energia do ambiente natural veio do processo de secagem da cadeia de suprimentos de briquetes não perfurados.

Um estudo de ACV dos resíduos de arborização urbana realizado por Araújo (2017) avaliou quatro cenários de gestão (1- aterro sanitário, 2- aproveitamento de metano, 3- incineração e 4- reutilização), e foi possível perceber que as emissões dos resíduos depositados no aterro sanitário geraram cerca de 4 mil t CO₂-eq, tendo este sido o cenário com maior impacto ambiental dentre os cenários estudados. Já o cenário de reutilização foi o de menor impacto ambiental com emissão de 753 t CO₂-eq. Ainda para o autor, o cenário de reutilização dos resíduos se apresentou como a melhor opção, pois evita produzir briquetes “virgens” ao reutilizar os resíduos da arborização e, se toda a biomassa gerada pela manutenção da

arborização urbana de João Pessoa fosse reutilizada na fabricação de briquetes, entre os anos de 2013 e 2015 as emissões evitadas seriam da ordem de 8.0 mil t CO₂-eq.

O quadro abaixo traz informações retiradas de trabalhos de ACV:

Quadro 1 – Fronteiras do sistema analisadas em estudos de ACV no âmbito da bioenergia e produção de briquetes e pellets de biomassa

Unidade Funcional	Fronteira	Referência
1 MJ de calor	Berço ao túmulo	Alanya-Rosenbaum; Bergman (2019).
1 kWh de eletricidade		
1 pizza/família	Berço ao túmulo	Condia; Silva; Ometto (2016).
1 kg de briquete	Berço ao portão	Rousset <i>et al.</i> (2011).
1 MJ	Berço ao túmulo	Oliveira (2013).
1 kg de pellets	Berço ao portão	Sfeir (2013).
1 MJ de energia térmica útil	Berço ao túmulo	Saba; El Bachawati; Malek (2020).

Fonte: Autora (2020).

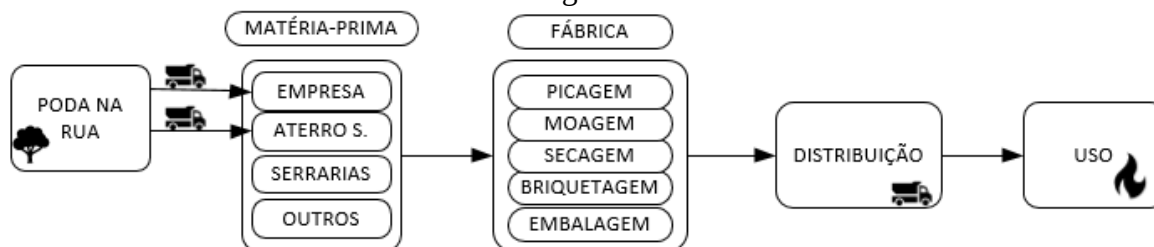
Tendo em conta o alinhamento dos objetivos dos trabalhos citados anteriormente com a presente pesquisa, estes foram de fundamental importância no auxílio para a definição do escopo neste estudo de ACV.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O primeiro momento da pesquisa envolveu a realização de visitas técnicas em órgãos ambientais e em uma empresa que produz briquetes, por meio da qual foi possível inter-relacionar e conhecer dois grandes eixos temáticos desta pesquisa, tais como: i) o uso de biomassa residual para gerar biocombustíveis/produção de energia – sistema de produção de briquetes (a partir do reaproveitamento de resíduos provenientes da poda urbana do município de Fortaleza entre outros), e ii) a avaliação do ciclo de vida do respectivo sistema de produto, ou seja, todo o processo de fabricação a nível industrial do briquete.

As visitas técnicas realizadas aos órgãos ambientais responsáveis pelo sistema de gestão de resíduos da poda urbana de Fortaleza surgem na pesquisa como uma iniciativa de caráter indutivo que permitiu tomar conhecimento de uma parceria existente entre a Prefeitura Municipal de Fortaleza (PMF) e uma empresa produtora de briquetes localizada em São Gonçalo do Amarante-Ceará, onde os resíduos provenientes da poda urbana são doados para a empresa e introduzidos no processo fabril. Além dos resíduos de poda obtidos pela PMF, a fábrica também recebe os resíduos da Companhia de Energia Elétrica (que executa serviços de manutenção em árvores), parte desses resíduos são encaminhados para um anexo da fábrica e posteriormente são levados para a fazenda onde está instalada a unidade operacional. A Figura 6 ilustra o processo de valorização destes resíduos desde a fase de geração da matéria-prima até à distribuição do produto final. Apesar do ciclo de vida do produto se estender até o uso final do biocombustível e descarte de coprodutos e resíduos do processo de combustão, este trabalho constitui uma ACV do produto do berço ao portão da fábrica.

Figura 6 – Fluxograma relativo ao processo resultante do acompanhamento da poda urbana, descritivo da ACV desde a produção do recurso até à distribuição do produto final em forma de energia térmica



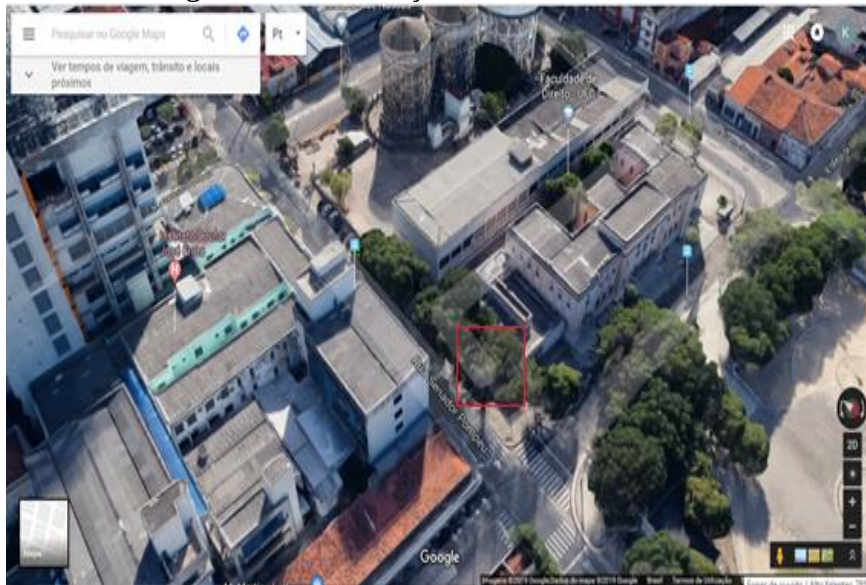
Fonte: Autora (2020).

3.1 Acompanhamento da Poda na Rua e Encaminhamento dos Resíduos ao Aterro Sanitário

No mês de fevereiro de 2019 realizou-se o acompanhamento de uma equipe terceirizada que presta serviços de poda e corte de árvores para a PMF – Figuras 7 e 8.

Em Fortaleza os órgãos pertencentes à PMF que têm responsabilidade direta e/ou indireta em relação à poda urbana e ao corte de árvores são a Secretaria Municipal da Conservação e Serviços Públicos (SCSP), Autarquia de Urbanismo e Paisagismo de Fortaleza (UrbFor) e a Secretaria Municipal de Urbanismo e Meio Ambiente (SEUMA).

Figura 7 – Localização das árvores cortadas



Fonte: Google Maps (2020).

Figura 8 – Equipe realizando o corte das árvores em Fortaleza



Fonte: Autora (2020).

A poda das árvores é realizada para correção, manutenção, limpeza, tratamento de parasitas e desobstrução de sinalização de trânsito. Já o corte, ocorre somente quando há risco de acidentes ou alguma edificação a ser construída no local⁹.

Normalmente, todo o resíduo gerado após a execução do corte das árvores é encaminhado para o Aterro Sanitário Metropolitano Oeste de Caucaia (ASMOC)¹⁰. A quantidade de resíduo disposta no aterro sanitário é controlada por meio do processo de pesagem eletrônica dos caminhões na cabine de controle existente na portaria. Na Figura 9, parte desse processo pode ser observado, com destaque para o veículo estacionado sobre a balança eletrônica, o resultado da pesagem e o comprovante da pesagem (ticket eletrônico).

Figura 9 – Detalhes do processo de pesagem da poda no ASMOC



Fonte: Autora (2020).

Os resíduos provenientes da poda são depositados separadamente na área do aterro sanitário, onde uma equipe com picadores e máquinas forrageiras fazem a trituração desses materiais. Após isso, são transportados em contêineres para a fábrica de briquetes.

3.2 Fábrica de Briquetes

Em São Gonçalo do Amarante, está localizada uma fazenda que dista aproximadamente 70 Km de Fortaleza. Dentre as diversas atividades existentes na fazenda, funciona uma fábrica de briquetes que, além dos resíduos de poda que saem do aterro sanitário, recebe outros tipos de resíduos e os introduz em seu processo produtivo.

A composição dos resíduos que entram no processo produtivo da fábrica são: material de serraria, sobra do coco, resíduos resultantes da poda de Fortaleza entre outros.

⁹ Informações repassadas por técnicos da UrbFor.

¹⁰ A distância percorrida entre a localização das árvores cortadas e o ASMOC foi de aproximadamente 24 Km.

Inicialmente os resíduos passam pelo processo de moagem (lasca-tora, picador vermeer BC1000 49 hp, picador metalcava 100 CV, moinho 30 CV), de modo que haja a diminuição de tamanho dos mesmos e, após essa redução, tem-se o cavaco¹¹ (as Figuras 10, 11 e 12 ilustram parte do processo de moagem dos materiais), utilizado na fabricação de briquetes.

Figura 10 – Lasca tora



Fonte: Autora (2020).

Figura 11 – Picador Vermeer



Fonte: Autora (2020).

Figura 12 – Picador Metalcava



Fonte: Autora (2020).

Para produzir os briquetes, a matéria-prima deve apresentar baixa umidade (ideal entre 8% e 10%), sendo que após o processo de moagem o material segue para o processo de secagem. Na fábrica analisada, a secagem é realizada de duas formas, através da exposição à radiação solar e por meio de um secador rotativo (utilizado principalmente em períodos chuvosos). O secador (ciclone, motor 30 CV) pode ser observado na Figura 13, e possui capacidade para 4.500 kg/h.

¹¹ Pequenas lascas de madeira.

Figura 13 – Secador rotativo (redução da umidade)



Fonte: Autora (2020).

Por fim, para o processo de briquetagem existem duas máquinas em operação na fábrica (briquetadeira do tipo prensa de pistão, da marca BIOMAX), com capacidade para processar 1150 kg/h e produz 40 cm de briquete a cada 9 segundos – Figuras 14 e 15. Segundo informações do fabricante, a produção mensal da empresa está em torno de 1.000 toneladas, com cerca de aproximadamente 380 clientes cadastrados nos estados do Ceará, Piauí e Pernambuco.

Figura 14 - Briquetadeira



Fonte: Autora (2020).

Figura 15 – Briquetes



Fonte: Autora (2020).

3.3 Estudo de ACV

Por se tratar de um estudo de ACV, esta pesquisa seguiu as recomendações das normas NBR ISO 14040:2009 e NBR ISO 14044:2009¹². Conforme os documentos normativos citados anteriormente, a estrutura metodológica para se estudar o ciclo de vida de um determinado produto é regida por quatro fases distintas, conforme identificado abaixo, e de acordo com as peculiaridades do estudo de ACV conduzido.

- 1) Definição de objetivo e escopo;
- 2) Análise de inventário;
- 3) Avaliação de impacto;
- 4) Interpretação.

3.3.1 Definição de objetivo e escopo

Realizar uma avaliação comparativa do ciclo de vida de briquetes, sob a perspectiva atribucional, considerando o sistema de produção convencional¹³ (cenário base C0: resíduos de serraria) e a alternativa (cenário C1: resíduo de serraria + resíduo de poda municipal), relativo à fabricação de briquetes de biomassa a comercializar e utilizar na região metropolitana de Fortaleza.

3.3.2 Função do produto

Neste estudo, sendo um combustível sólido renovável, o briquete de biomassa residual é considerado como o produto final, tendo a finalidade de gerar energia térmica a partir da sua combustão. O combustível é muito utilizado em indústrias que necessitem de geração de energia e vapor, tais como: indústria alimentícia em fornos de pizzarias, padarias, churrascarias, olarias ou cerâmica, caldeiras de lavanderias, gesso, cimento etc.

3.3.3 Unidade Funcional

Este trabalho contempla a avaliação do ciclo de vida do combustível em estudo numa perspectiva *cradle to gate* (berço ao portão da fábrica), incluindo a análise de impactos ambientais desde o aproveitamento do resíduo de biomassa (madeira resultante da poda) até à

¹²Ambas as normas passaram por correções, com erratas publicadas em 2014.

¹³A produção convencional considera os resíduos de serraria para a produção de briquetes (nesta pesquisa, o cenário C0). O cenário C1 insere o resíduo da poda municipal na produção de briquetes (cenário alternativo).

obtenção do produto final (briquete de biomassa). O estudo não inclui a fase de uso do produto, sendo a unidade funcional 1 tonelada de briquete de biomassa produzido, a comercializar na região metropolitana de Fortaleza.

A abordagem (do berço ao portão da fábrica) foi escolhida com vista a identificar os impactos do produto em estudo, bem como oportunidades de melhoria da sustentabilidade ambiental associadas à sua fabricação.

3.3.4 Fluxo de referência

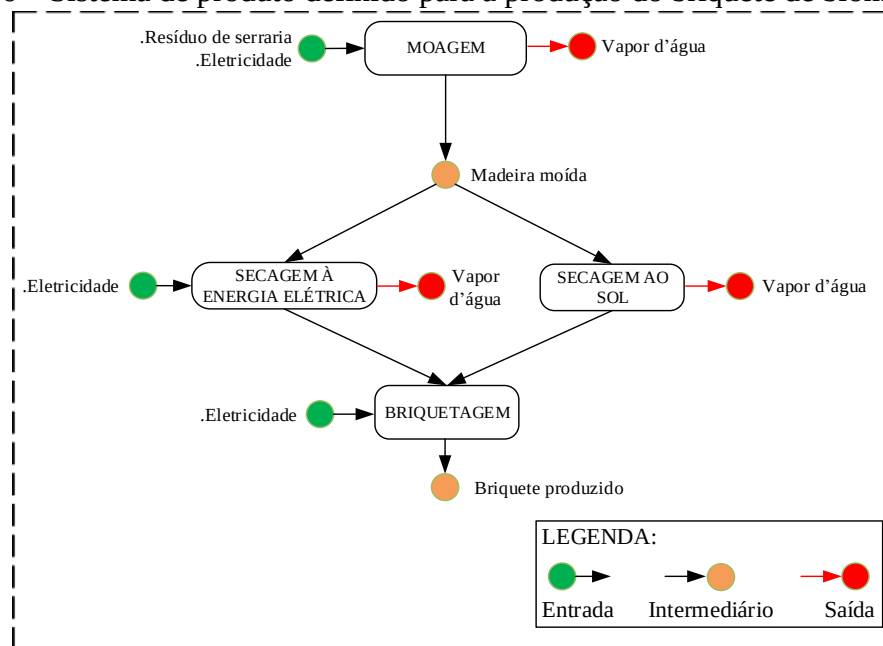
O fluxo de referência definido foi igual a unidade funcional, ou seja, a produção de 1 tonelada de briquete de biomassa.

3.3.5 Sistema de produto

A seguir, as figuras ilustradas nesse tópico apresentam o sistema de produto para o ciclo de vida do briquete para os dois cenários comparados nesta pesquisa: o cenário base, que se constitui de resíduos de serraria (C0) e o cenário alternativo (C1), que inclui em seu processo os resíduos resultantes da poda municipal de Fortaleza/CE. O estudo tem abordagem do berço ao portão da fábrica.

A Figura 16 apresenta o sistema de produto para o C0 considerando as seguintes unidades de processo:

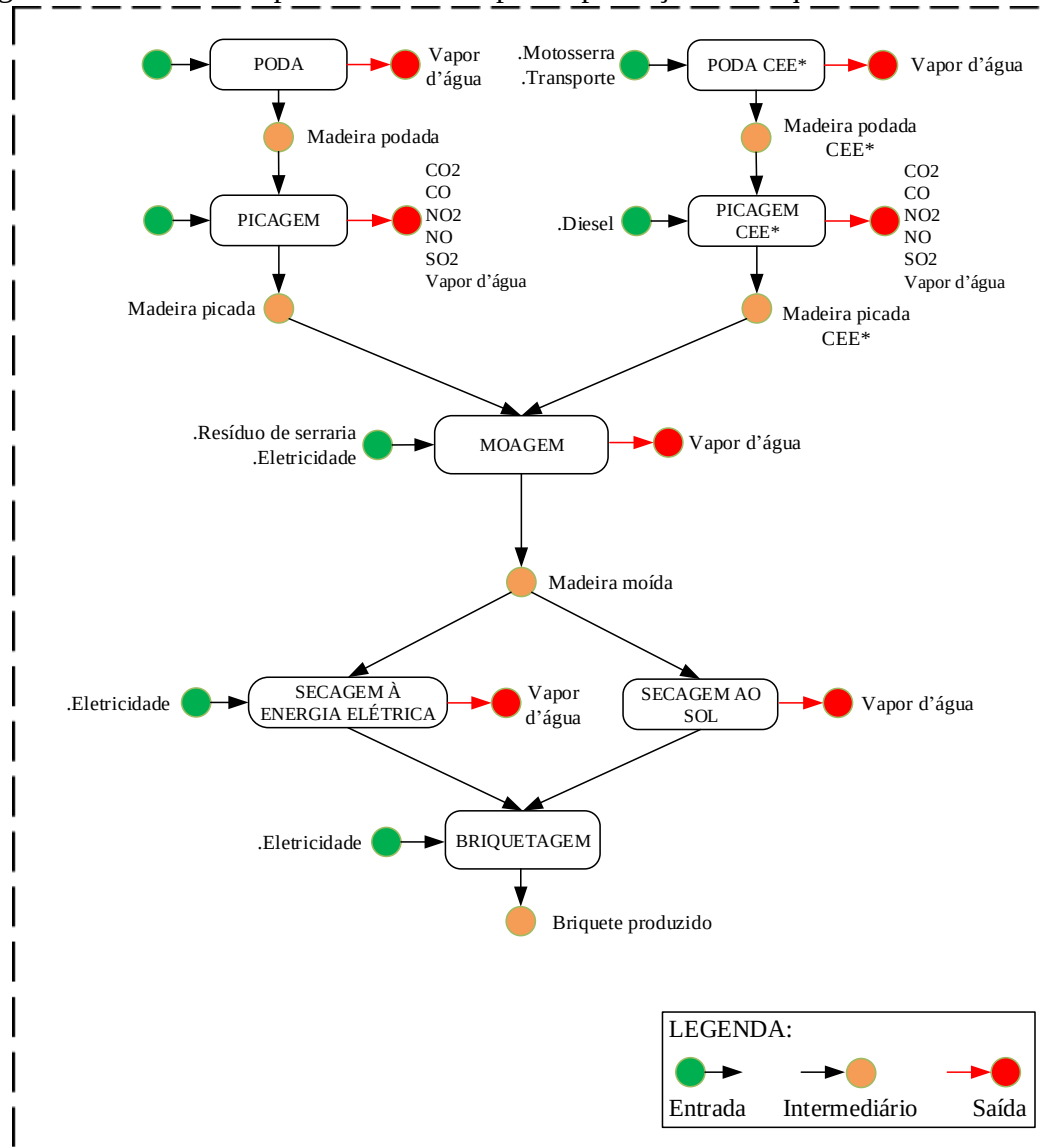
Figura 16 – Sistema de produto definido para a produção do briquete de biomassa do C0



Fonte: Autora (2020).

A Figura 17 apresenta o sistema de produto para o ciclo de vida do briquete correspondente ao C1, que inclui os resíduos resultantes da poda municipal de Fortaleza/CE.

Figura 17 – Sistema de produto definido para a produção do briquete de biomassa do C1



Fonte: Autora (2020).

3.3.6 Fronteiras

Fronteira geográfica

A fronteira geográfica foi estipulada com base no funcionamento de uma empresa produtora de briquete localizada no Estado do Ceará e que produz briquetes de biomassa consumidos em Fortaleza e região metropolitana, bem como em outras regiões. Neste contexto, este estudo visa a análise de um caso real de produção de briquetes a partir de biomassa residual coletada pelos

serviços municipais de gestão de resíduos sólidos na cidade de Fortaleza. A fim de se iniciar a análise de inventário relativa aos fluxos de materiais e energia na etapa associada às operações de poda e transporte de processamento dos resíduos ao aterro sanitário, foram realizadas visitas técnicas aos órgãos ambientais (Secretaria Municipal de Conservação e Serviços Públicos e Autarquia de Urbanismo e Paisagismo de Fortaleza) responsáveis por planejar, coordenar e executar atividades relacionadas à limpeza urbana do município, bem como pela gestão dos resíduos sólidos urbanos em Fortaleza.

Desta forma, o trabalho envolveu diversas visitas técnicas aos locais onde ocorreu a poda das árvores da cidade, bem como à unidade industrial¹⁴ onde se realiza a fabricação dos briquetes de biomassa. Durante a fase de elaboração do inventário foram coletados dados relativos aos fluxos de materiais, energia e água associados à operação da unidade fabril.

Para outros insumos considerados dentro da fronteira foram adotadas informações da literatura e de processos associados à base de dados Ecoinvent, disponíveis e relacionadas a processos de gestão de resíduos da poda de árvores em áreas urbanas e seu processamento para fabricação de biocombustíveis sólidos, por meio da coleta de dados secundários.

Fronteira temporal

Para a definição da fronteira temporal foram consultados dados da empresa referentes ao ano de 2019.

Fronteira tecnológica

As pesquisas realizadas mostraram que as indústrias produtoras de briquetes utilizam processos produtivos semelhantes.

A realização desta pesquisa esteve fundamentada na tecnologia utilizada por uma empresa produtora de briquetes localizada no Estado do Ceará, considerada uma das principais do Estado. Poucas diferenças tecnológicas foram encontradas comparando a empresa visitada com as pesquisas realizadas na literatura (CONDIA; SILVA; OMETTO, 2016; ROUSSET *et al.*, 2011; SFEIR, 2013). Um exemplo de particular interesse tecnológico verificado foi o fato de a fábrica em estudo adquirir matéria-prima de fonte diferente das demais empresas pesquisadas e de se tratar de um resíduo usualmente descartado em aterro sanitário. Todavia, os processos produtivos envolvidos na preparação dos biocombustíveis sólidos são

¹⁴ Uma das principais empresas produtoras de briquetes de biomassa do Estado do Ceará.

considerados similares para a fábrica estudada e demais fábricas identificadas na literatura analisada.

3.3.7 Software

Neste trabalho utilizou-se o software SimaPro licença PhD versão 8.0.3.14 licenciada pelo Laboratório de Energias Renováveis e Conforto Ambiental (LERCA) do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE). O software SimaPro tem origem holandesa e foi desenvolvido pela *Pré Consultants*. É uma ferramenta que contém mais de 20 métodos de avaliação de impacto e mais de 9 bibliotecas de inventários, que trazem informações acerca de dezenas de milhares de processos e produtos. O SimaPro está disponível para uso educacional (academia) e profissional (empresas em geral).

3.3.8 Métodos de AICV

O método utilizado na presente ACV foi o ReCiPe *midpoint* (ponto médio), a fim de avaliar diversos impactos ambientais associados à fabricação de briquetes no contexto da literatura global no que diz respeito a estudos de ACV aplicados à análise de biocombustíveis alternativos.

No ReCiPe¹⁵, os indicadores são determinados em dois níveis: 18 indicadores de ponto médio e 3 indicadores de ponto final. Este método (ReCiPe) apresenta vantagens em relação a outras abordagens, dentre elas, um conjunto mais amplo de categorias de impacto no ponto médio.

Neste contexto, e considerando os impactos ambientais associados à produção de biocombustíveis sólidos densificados como os briquetes de biomassa residual, as categorias de impacto analisadas nesta pesquisa foram as seguintes:

- Mudanças climáticas;
- Depleção de ozônio;
- Acidificação terrestre;
- Eutrofização de água doce;
- Ocupação de terras agrícolas;

¹⁵ Criado pela *National Institute for Public Health and Environment* (RIVM), CML, *PRé Consultants*, *Radboud Universiteit Nijmegen e Committed to the Environment* (CE Delft). Foi desenvolvido baseado nos métodos CML e Eco-indicator99.

- Transformação natural da terra;
- Depleção de água;
- Depleção fóssil.

3.3.9 Procedimentos de alocação

A presente pesquisa não contempla a definição de procedimentos de alocação. Visto que o sistema de produto definido não apresentou multifuncionalidade.

3.3.10 Tipos de impactos, método de avaliação de impacto e interpretação

O método de avaliação e os tipos de impactos utilizados nesta pesquisa foram definidos e identificados na seção 3.3.8.

A interpretação adotada para os resultados procedentes da avaliação de impactos se deu na identificação dos *hotspots* ambientais para cada categoria de impacto do método de Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (AICV).

3.3.11 Requisito de qualidade dos dados

Para que os resultados sejam confiáveis, é fundamental a obtenção de dados de qualidade. Portanto, os dados inventariados relacionados com as entradas e saídas para o sistema de produto analisado foram coletados em fontes primárias, em uma empresa produtora de briquetes no Estado do Ceará. Os dados apresentados nesta dissertação foram obtidos durante visitas técnicas realizadas na empresa citada anteriormente. Alguns dados foram obtidos por meio de monitoramento a partir de questionamentos da autora e, outros dados foram estimados/adaptados (com base na produção da empresa), devido à falta de informação por parte do fabricante.

3.3.12 Limitações

Embora o estudo tenha um bom nível de detalhes e apresente dados primários, limitações foram verificadas e devem ser levadas em conta.

A primeira limitação se deu em virtude das etapas de uso e disposição final do produto, que não foram consideradas no estudo devido à falta de informações. Vale salientar a compilação de dados reais, que compõem um banco de informações locais.

Limitações também foram verificadas com relação a aquisição e precisão de algumas informações, pois o fabricante não dispunha de todos os dados necessários para a realização

deste estudo. Portanto, algumas informações foram estimadas pelo fabricante e nem todas as informações repassadas foram aferidas devido à falta de recursos técnicos.

Outra limitação advém da falta de dados sobre a etapa de embalagem no interior da empresa, que não foi considerada neste estudo.

3.4 Inventário do ciclo de vida

Os dados inventariados foram estruturados em planilhas eletrônicas, sendo estes dados provenientes de fontes primárias e secundárias, os cálculos foram realizados através de balanços de massa. A planilha de inventário está no Apêndice A.

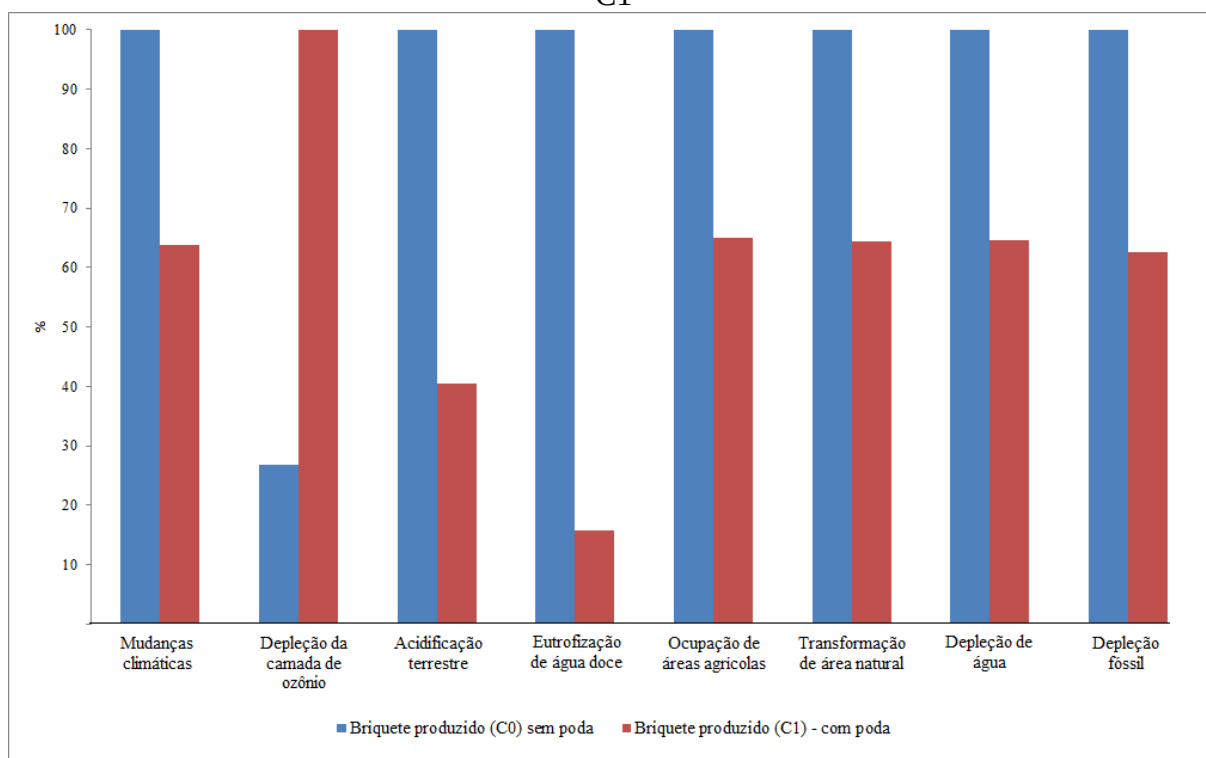
Apresentação

Este capítulo reúne os resultados alcançados com a avaliação de ciclo de vida do briquete. Aborda os resultados da comparação entre os dois cenários avaliados (C0 e C1 - descritos na metodologia) e das categorias de impactos.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para todas as categorias de impactos analisadas, exceto Depleção da Camada de Ozônio, os resultados obtidos na modelação no Simapro mostram um menor impacto ambiental do cenário alternativo C1, quando comparado com o cenário base (C0), como pode ser observado na Figura 18:

Figura 18 – Comparativo dos impactos ambientais dos cenários de produção de briquetes C0 e C1



Fonte: Autora (2020).

É possível observar que o cenário C1 apresentou impactos inferiores à C0 nas categorias de Mudanças Climáticas, Acidificação Terrestre, Eutrofização de Água doce, Ocupação de Áreas Agrícolas, Transformação de Área Natural, Depleção de Água e Depleção Fóssil, ficando C0 como o melhor cenário somente na categoria Depleção da Camada de Ozônio.

Ao reduzir a quantidade de resíduo de serraria no processo, com a incorporação de resíduo de poda municipal (cenário C1), as categorias Eutrofização de Água Doce e Acidificação Terrestre apresentaram melhores desempenhos, com redução de 85% e 60%, respectivamente, quando comparados ao cenário que utiliza somente o resíduo de serraria, C0.

Para a categoria Mudanças Climáticas, houve uma redução de 37% nas emissões de GEE no cenário C1 (57 kg CO₂ eq/ton. de briquete) em comparação com o cenário C0 (89 kg CO₂ eq/ ton. de briquete). Possivelmente, os impactos do C0 estão diretamente relacionados aos processos de usinagem realizados nas serrarias que incluem cargas ambientais associadas ao processamento da madeira de serraria. Em ambos os cenários, o processo de transporte foi o que mais contribuiu com as emissões de GEE. Estas emissões estão associadas ao uso de combustíveis fósseis, tais como o petróleo.

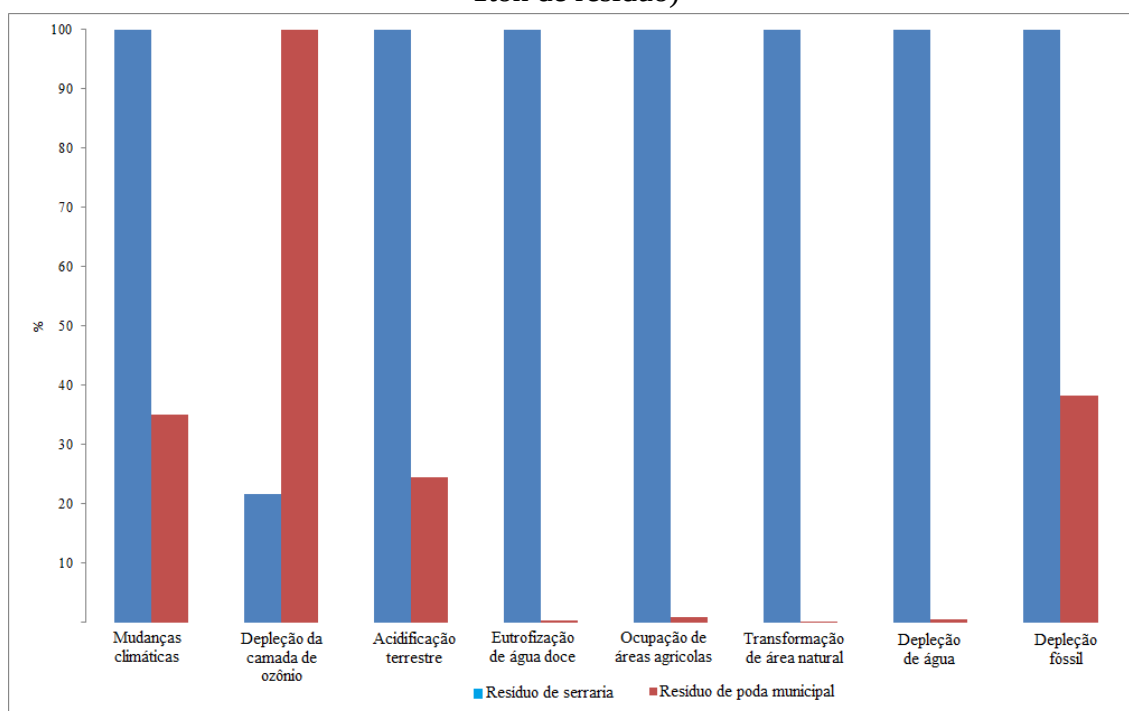
Quatro categorias de impacto apresentaram um comportamento semelhante, com relação à redução de impactos de C1 em comparação com C0. Nas categorias Ocupação de Áreas Agrícolas, Transformação de Área Natural e Depleção de Água, o cenário C1 apresentou valores 36% inferiores à C0, sendo o processo de produção de eletricidade o principal contribuinte para os impactos do produto final. Esta situação pode ser justificada pelo fato da matriz energética brasileira ter uma grande percentagem de uso de energia hidrelétrica; já na categoria Depleção Fóssil, os benefícios da produção de briquetes a partir de resíduos de poda foi levemente superior, na ordem de 38%.

Já na categoria Depleção da Camada de Ozônio, o cenário C1 apresentou impactos 74% superiores ao cenário base ($2,4 \times 10^{-6}$ kg CFC eq/tonelada de briquete), sendo tal resultado derivado, principalmente, pelo consumo de fontes fósseis como o petróleo e gás. Semelhante ao resultado obtido nesta categoria, um trabalho realizado por Martins (2017) mostrou que o fator mais impactante na categoria Depleção da Camada de Ozônio foi a etapa do transporte, devido a emissão de CFC. Diante disso, essa emissão elevada no C1 se justifica pelo fato das rotas de transporte (caminhão) associadas, considerando que antes de ser encaminhado para a fábrica, os resíduos de poda são levados ao aterro sanitário e só depois seguem para a unidade fabril. Já no C0 não houve alocação de cargas ambientais no transporte de madeira para as unidades de processamento da serraria.

Sendo os resíduos de serraria e de poda municipal o principal ponto de divergência entre os cenários avaliados, foi realizada uma comparação entre os processos de serragem e madeira podada para que fosse possível evidenciar de forma mais clara, o desempenho ambiental de cada uma das entradas. Como é possível verificar na Figura 19, o resíduo de poda municipal apresentou impactos inferiores ao resíduo da serraria em sete, das oito categorias analisadas

(Mudanças Climáticas, Acidificação Terrestre, Eutrofização de Água Doce, Ocupação de Áreas Agrícolas, Transformação de Área Natural, Depleção de Água e Depleção Fóssil), enquanto o resíduo de serraria apresentou impacto inferior apenas na categoria Depleção da Camada de Ozônio.

Figura 19 – Comparativo dos impactos ambientais relativos à produção da biomassa de resíduos de serraria e ao resíduo de poda municipal (foi considerada a unidade de análise de 1ton de resíduo)



Fonte: Autora (2020).

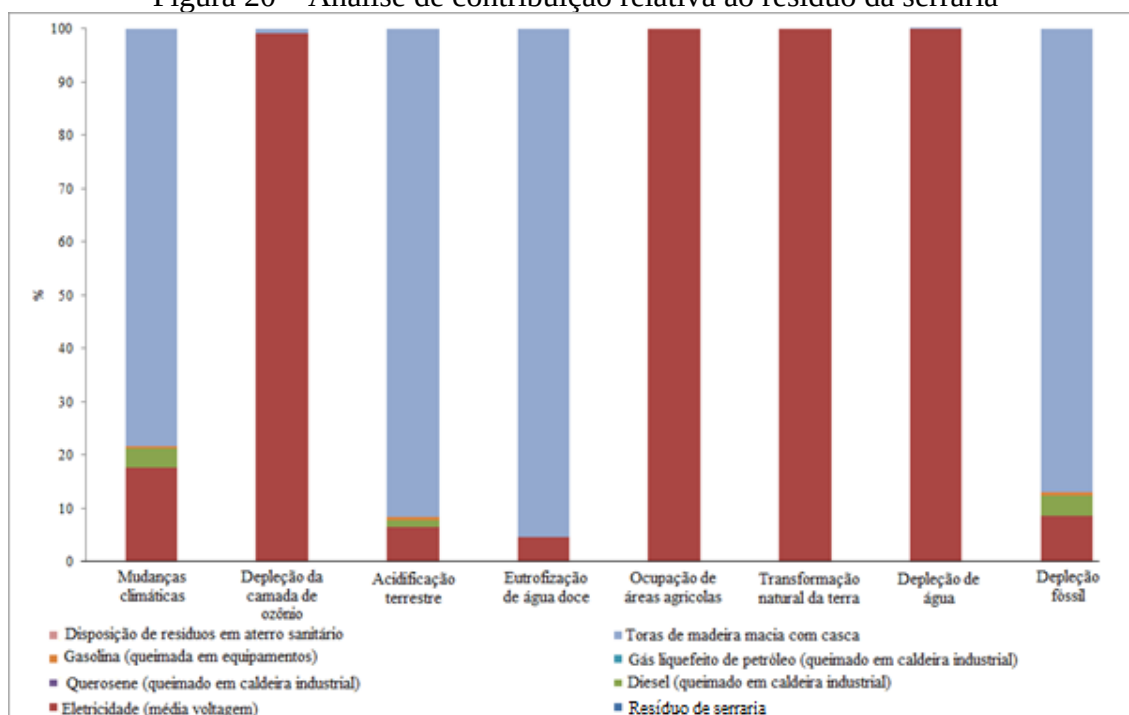
Ao analisar o resíduo da poda, as categorias Eutrofização de Água Doce, Ocupação de Áreas Agrícolas, Transformação de Área Natural e Depleção de Água apresentaram os melhores desempenhos, com resultados 99,7%, 99,1%, 99,8% e 99,5% inferiores, respectivamente, ao resíduo de serraria.

Ainda para o resíduo de poda, outras três categorias apresentaram impactos reduzidos (Mudanças Climáticas, 66%; Acidificação Terrestre, 76% e Depleção Fóssil, 62%) quando comparado ao resíduo de serraria.

Já na categoria Depleção da Camada de Ozônio, a biomassa produzida a partir do resíduo de serraria se destacou, apresentando impacto inferior de 79% ($2,06 \times 10^{-6}$ kg CFC eq/tonelada de briquete) quando comparado com a biomassa produzida a partir do resíduo da poda ($9,50 \times 10^{-7}$ kg CFC eq/tonelada de briquete). Esta situação pode ser explicada por conta do transporte (incluído no processo da poda), que está associado às emissões de CFC.

Após analisar a comparação dos cenários, foi realizada a análise isolada de ambos os tipos de resíduos, naquilo que é conhecido dentro da ACV como Análise de Contribuição de processos, ou seja, hotspots ou fontes de impactos ambientais de cada processo, como podem ser vistos nas Figura 20 e Figura 21.

Figura 20 – Análise de contribuição relativa ao resíduo da serraria



Fonte: Autora (2020).

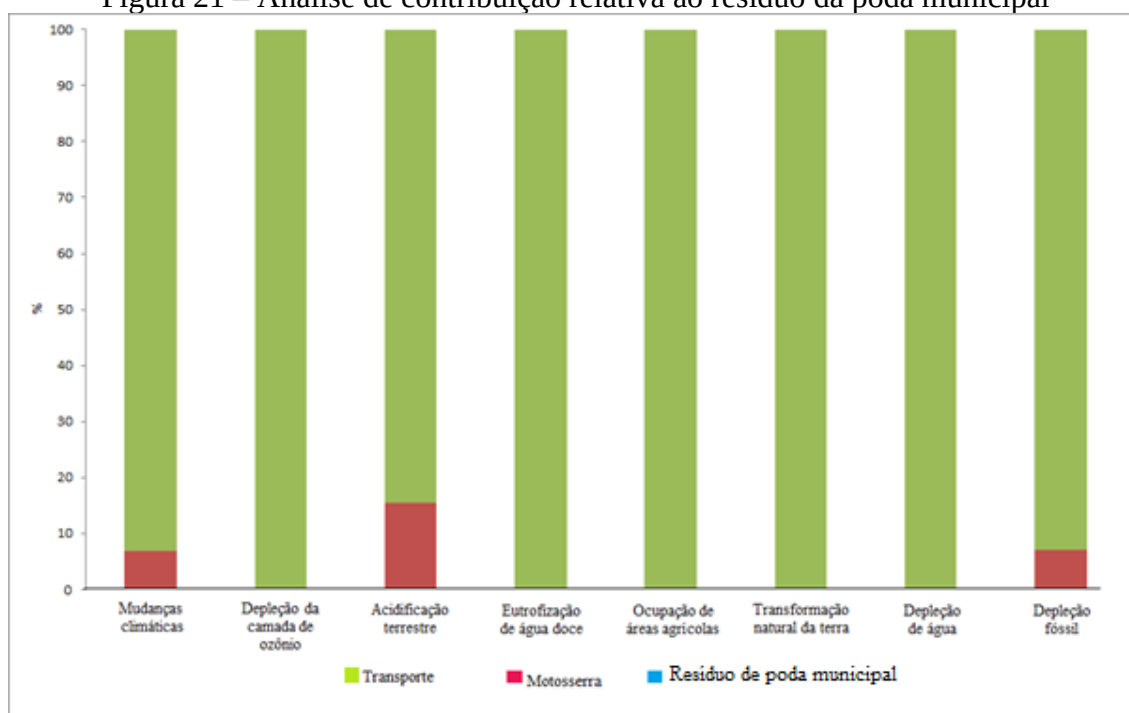
A análise de contribuição do resíduo da serraria mostrou que a eletricidade é a entrada mais relevante, sob o ponto de vista de impacto. Apesar de apresentar impacto em todas as categorias analisadas, a eletricidade apresentou impactos próximos da ordem de 100%, em quatro categorias (Depleção da Camada de Ozônio, para Ocupação de Áreas Agrícolas, Transformação de Área Natural e Depleção de Água).

Outro fator que manifestou impactos superiores em diversas categorias foi referente às toras de madeira (processo que está alocado na entrada de serragem no *software*) envolvidas no processo, afetando principalmente Mudanças Climáticas, 78%; Acidificação Terrestre, 91%; Eutrofização de Água Doce, 95% e Depleção Fóssil, 86%.

Embora em menor proporção, os combustíveis fósseis (diesel e gasolina) também apresentaram impactos em algumas categorias (Mudanças Climáticas, Acidificação Terrestre e Depleção Fóssil), porém, significativamente pequenos quando associados a outras fontes.

A Figura 21 ilustra os impactos ambientais relativos ao resíduo da poda municipal.

Figura 21 – Análise de contribuição relativa ao resíduo da poda municipal



Fonte: Autora (2020).

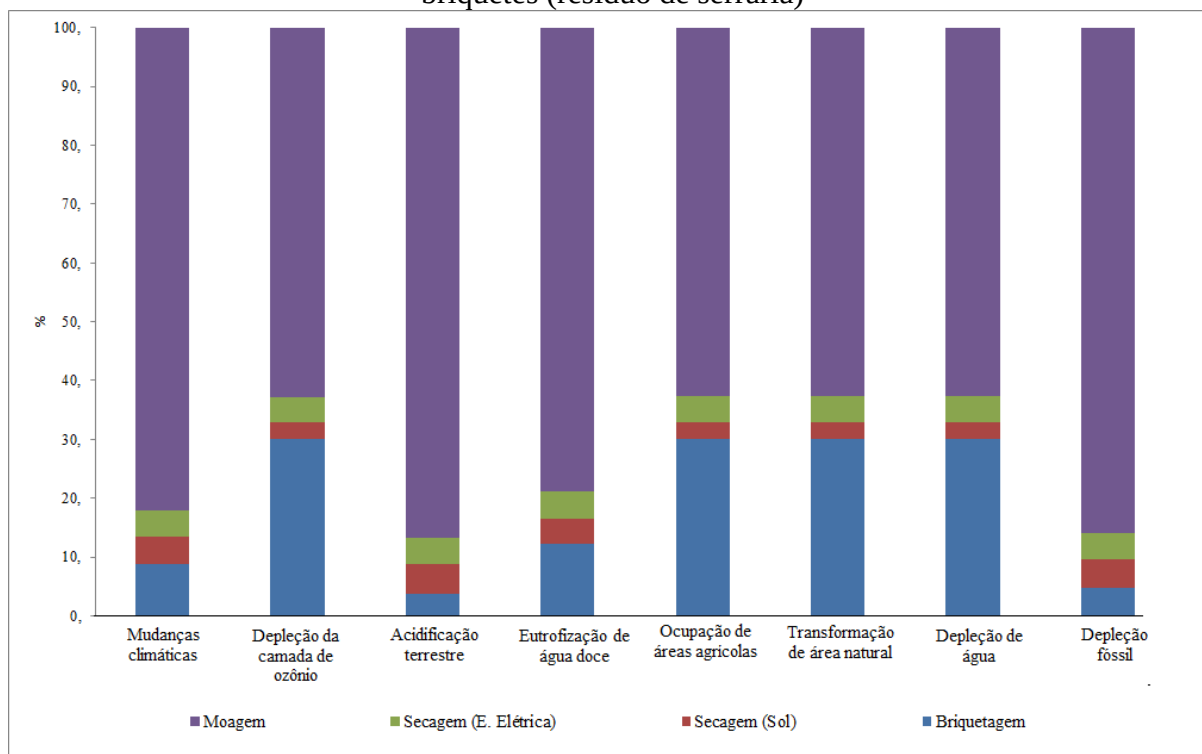
Com relação ao resíduo da poda municipal, a motosserra apresentou impactos inferiores ao transporte nas oito categorias analisadas, portanto, o transporte prevaleceu o mais impactante em todas elas. Esse resultado tem ligação com a quantidade de combustível gasto na motosserra para o corte de 1 tonelada, e no uso de combustível para transportar a mesma quantidade da matéria-prima, levando em consideração a rota estabelecida pela empresa (vale salientar que a matéria-prima é deslocada de um município para outro). Por fim, consequentemente as emissões oriundas do uso do transporte são maiores que da motosserra.

Para a categoria Mudanças Climáticas, houveram emissões de CO₂ para a motosserra, correspondentes a 6,8% (1,09 kg CO₂ eq/tonelada de resíduo de poda), já para o transporte o valor correspondente foi de 14,97 kg CO₂ eq/tonelada de resíduo de poda (equivalente a 93,8%). Para a Acidificação Terrestre e Depleção Fóssil, a motosserra apresentou contribuições na ordem de 15,5% e 6,9%, respectivamente, já o transporte apresentou contribuições de 84,5% e 93%. Ou seja, a motosserra apresentou contribuições inferiores às do transporte.

Cinco categorias apresentaram comportamentos semelhantes com relação aos impactos do transporte (Depleção da Camada de Ozônio, Eutrofização de Água Doce, Ocupação de Áreas Agrícolas, Transformação de Área Natural e Depleção de Água), representando impactos da ordem dos 99% para Depleção da Camada de Ozônio e próximo dos 100% para as demais (Eutrofização de Água Doce, Ocupação de Áreas Agrícolas, Transformação de Área Natural e Depleção de Água).

A Figura 22 ilustra os impactos ambientais associados à análise de contribuição do briquete produzido no cenário base (C0) ao longo de toda a cadeia de valor do portão ao portão da fábrica:

Figura 22 – Análise de contribuição do cenário base C0 na cadeia de valor de produção de briquetes (resíduo de serraria)



Fonte: Autora (2020).

Para o briquete produzido a partir de madeira de serraria (Cenário Base - C0), é possível observar que o processo que apresentou mais impactos foi a moagem, em todas as categorias, mas principalmente em Mudanças Climáticas, Acidificação Terrestre, Eutrofização de Água Doce e Depleção Fóssil. Esse resultado pode estar diretamente relacionado com a quantidade de energia elétrica utilizada para alimentar os dois moinhos envolvidos no processo. Os impactos gerados nas categorias anteriormente citadas (Mudanças Climáticas, Acidificação Terrestre, Eutrofização de Água Doce e Depleção Fóssil) corresponderam a 82%, 86%, 78%, 85%, respectivamente. As demais categorias (Depleção da Camada de Ozônio, Ocupação de Áreas Agrícolas, Transformação de Área Natural e Depleção de Água) apresentaram impactos na mesma ordem de grandeza, 62% para ambas as categorias no processo de moagem.

O processo de briquetagem está também associado a um grande consumo de energia elétrica e foi o segundo a demonstrar impactos ambientais mais elevados, associados à algumas categorias, nomeadamente para a Depleção da Camada de Ozônio, Ocupação de Áreas

Agrícolas, Transformação de Área Natural e Depleção de Água, correspondendo a 30% dos impactos globais nas respectivas categorias. Já nas demais categorias: Mudanças Climáticas, Acidificação Terrestre, Eutrofização de Água Doce e Depleção Fóssil, a briquetagem apresentou impactos de 8%, 3%, 12% e 4%, respectivamente.

O processo de secagem associado ao consumo de energia elétrica também apresentou impactos nas categorias analisadas. Para as categorias Mudanças Climáticas, Depleção da Camada de Ozônio, Acidificação Terrestre, Eutrofização de Água Doce, Ocupação de Áreas Agrícolas, Transformação de Área Natural, Depleção de Água e Depleção Fóssil) os impactos emitidos foram de aproximadamente 4,5%. Para a secagem ao sol, não houveram impactos decorrentes do processo, portanto, todas as categorias ficaram com impacto zero.

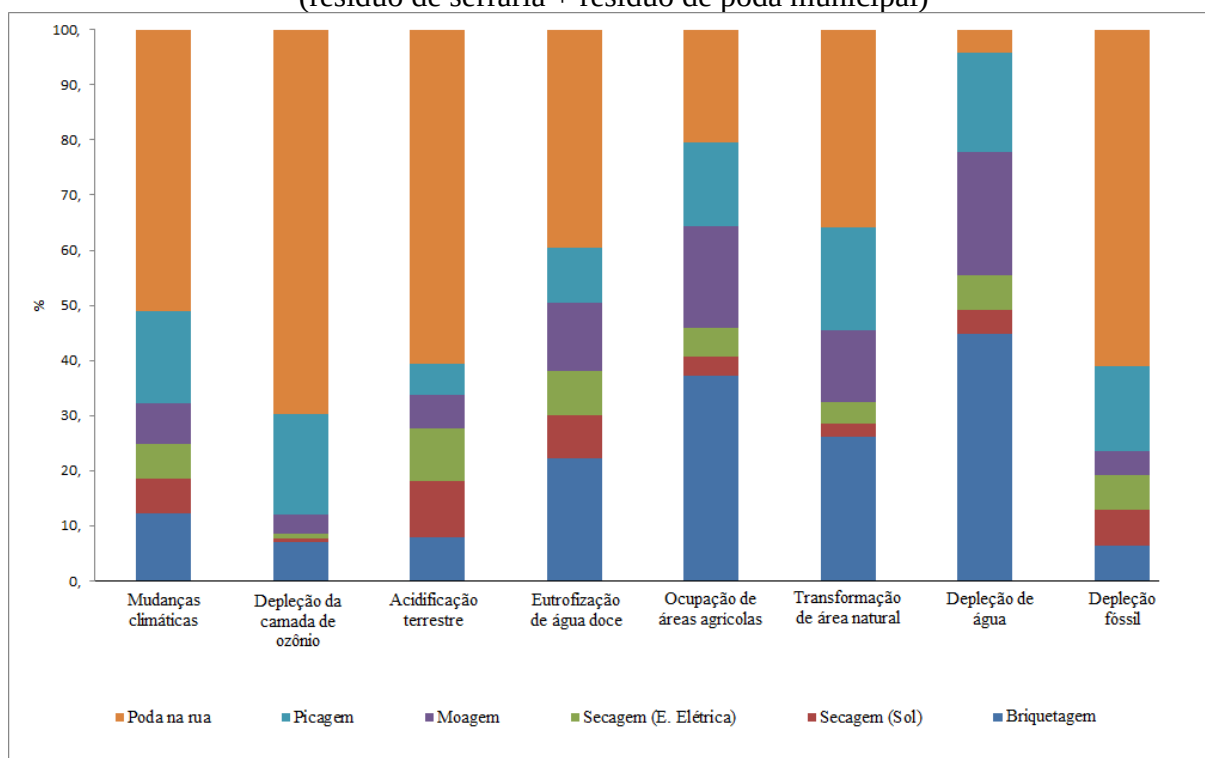
No âmbito de outras pesquisas de ACV relacionadas à produção de briquetes, Saba, El Bachawati e Malek (2020) objetivaram analisar os impactos ambientais do ciclo de vida de briquetes de biomassa produzidos a partir de resíduos de poda de azeitona, com abordagem comparativa porta a porta desses produtos. Foi possível observar que a etapa de manufatura do processo analisado pelos autores apresentou impactos negativos para a categoria Mudanças Climáticas, com uma contribuição deste processo de 19% nesta categoria.

Wang *et al.* (2017), ao realizarem uma ACV de briquetes produzidos na China a partir dos resíduos de milho, com abrangência do berço ao túmulo e unidade funcional de 1 tonelada de produção e utilização de briquete de milho, demonstraram que a fase de fabricação do briquete dominou a maioria das categorias de impactos, sendo responsável por mais de 70% do impacto total do potencial de Aquecimento Global; 75% para Acidificação Terrestre; 73% para Eutrofização de Água Doce; 40% para Transformação Natural da Terra.

De forma relativamente diferente, pois este estudo não contemplou a etapa de uso final do briquete, foi possível perceber que a fase de produção (produzido com resíduo de serraria) que apresentou os maiores impactos ambientais para algumas das categorias de impactos analisadas, foi o processo de moagem, com contribuições da ordem de 82% para Mudanças Climáticas, 86% para Acidificação Terrestre e 85% para Depleção Fóssil.

A Figura 23 apresenta os impactos associados à contribuição de cada processo para o C1:

Figura 23 – Análise de contribuição do cenário C1 na cadeia de produção de briquetes (resíduo de serraria + resíduo de poda municipal)



Fonte: Autora (2020).

No caso da ACV dos briquetes produzidos com resíduos de poda municipal e resíduos de serraria (cenário C1), foi possível perceber que os processos de poda e briquetagem apresentaram maiores contribuições do que os processos de picagem, moagem e secagem.

No C1, o processo de poda apresentou impactos significativos em todas as categorias, mas se destacou em Mudanças Climáticas (51%), Depleção da Camada de Ozônio (69,7%), Acidificação Terrestre (60,5%) e Depleção Fóssil (60,9%). Nas demais categorias, o processo de poda também apresenta impactos expressivos, mas em proporções menores, nomeadamente para a Eutrofização de Água Doce (39,6%), Ocupação de Áreas Agrícolas (20,5%) e Transformação de Área Natural (35,9%). Para o processo de briquetagem as duas categorias que mais impactaram foi Ocupação de Áreas Agrícolas (37,1%) e Depleção de Água (44,9%); os resultados foram semelhantes para as categorias Eutrofização de Água Doce e Transformação de Área Natural, com emissões de 22% e 26%, respectivamente. A categoria de Eutrofização de Água Doce está relacionada com o elevado nível de nutrientes na água, especialmente a partir de substâncias à base de nitrogênio ou fósforo, impactando na diminuição da concentração de oxigênio dissolvido, afetando diversos organismos ali presentes. Tais aspectos podem estar diretamente relacionados às centrais de energia elétrica, que fornecem significativas quantidades de energia utilizada no processo. Os impactos foram reduzidos nas

categorias Mudanças Climáticas (12%), Depleção da Camada de Ozônio (6,9%), Acidificação Terrestre (7,8%) e Depleção Fóssil (6,3%).

O processo de moagem apresentou impactos reduzidos, exceto para as categorias de Ocupação de Áreas Agrícolas e Depleção de Água, principalmente quando comparado ao C0 (onde a moagem foi o que mais ocasionou impactos). Os resultados desse processo para as categorias: Mudanças Climáticas, Depleção da Camada de Ozônio, Acidificação Terrestre, Eutrofização de Água Doce, Ocupação de Áreas Agrícolas, Transformação de Área Natural, Depleção de Água e Depleção Fóssil apresentam contribuição relativa inferior a 25%, sendo a maior contribuição na categoria Depleção de Água. A moagem se mostrou menos impactante no cenário C1. Este resultado está relacionado com o fato de no C0 não constarem os processos de Poda na rua e Picagem, processos estes que consomem combustíveis fósseis e elevada quantidade de energia elétrica no funcionamento das máquinas.

Para a picagem, os impactos relativos foram de 18,7% para Transformação de Área Natural; 18%, Depleção da Camada de Ozônio; 17,9%, Depleção de Água; 16,7%, Mudanças Climáticas; 15,4%, Depleção Fóssil; 15,1%, Ocupação de Áreas Agrícolas; 9,9%, Eutrofização de Água Doce; 5,7%, Acidificação Terrestre.

A secagem mecanizada, sendo um processo que utiliza quantidades significativas de eletricidade, contribuiu para a Eutrofização de Água Doce em 8,1%; Depleção de Água, 6,4%; sendo que as demais categorias (Mudanças Climáticas, Transformação de Área Natural, Ocupação de Áreas Agrícolas e Depleção da Camada de Ozônio) apresentaram contribuições inferiores a 5. Neste estudo, para o processo de secagem ao sol não foram alocadas cargas ambientais.

Nas Figuras 22 e 23, foram observadas divergências com relação aos impactos apresentados no processo de secagem ao sol, portanto, foi realizada uma comparação entre os processos de secagem ao sol e secagem à energia elétrica, objetivando evidenciar de forma mais clara os impactos associados para ambos os processos. O resultado da comparação demonstrou que para o processo de secagem ao sol não existem impactos associados para nenhuma das categorias analisadas, assim sendo, os impactos gerados são em decorrência da secagem à energia elétrica.

Condia, Silva e Ometto (2016) ao realizarem uma ACV simplificada de briquetes produzidos a partir de serragem de madeira, observaram que a manufatura foi a etapa do ciclo de vida em que ocorreram os maiores impactos, especialmente devido aos processos de secagem e briquetagem. Comparando os resultados obtidos do portão ao portão, os resultados encontrados no estudo citado, apresentaram similaridade com os apresentados nesta pesquisa,

principalmente para os impactos associados ao processo de briquetagem, com destaque para o consumo de eletricidade utilizada no processo.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Apesar de ser um produto de origem renovável, que emprega o aproveitamento de resíduos advindos de serrarias e também de poda municipal, sendo visto como um produto ecológico, o briquete de biomassa não está desprovido de impactos ambientais.

A produção de briquetes com a inserção dos resíduos provenientes da poda municipal (C1) apresentou menores impactos ambientais em relação ao cenário base, onde há apenas a utilização de resíduos da serraria(C0). Esse ganho está diretamente ligado ao ciclo de vida do resíduo da poda, que mitigou os impactos referentes à produção e transporte das toras de madeiras até a serraria.

Os processos que envolvem o alto consumo de eletricidade e combustíveis fósseis são os responsáveis pelos maiores níveis de impactos ambientais ao longo do processo de fabricação dos briquetes. Neste contexto, este estudo reforça a importância de adoção de equipamentos de maior eficiência energética na unidade fabril de produção de briquetes. Considerando a relevância dos impactos ambientais associados ao processo de poda, o estudo recomenda a troca dos equipamentos utilizados no abate da madeira por motosserras que utilizem outras fontes de energia. Em ambos os casos, a implantação de um sistema de energia solar fotovoltaico também é uma opção a ser explorada, em detrimento do uso de eletricidade da rede elétrica e combustíveis fósseis.

No contexto global, este estudo permite destacar o desempenho ambiental dos briquetes produzidos a partir de resíduos oriundos de poda municipal, como alternativa para a transição para uma economia mais circular no contexto da bioeconomia emergente.

REFERÊNCIAS

- ALANYA-ROSENBAUM, S.; BERGMAN, R. D. Life-cycle impact and exergy based resource use assessment of torrefied and non-torrefied briquete use for heat and electricity generation. **Journal of Cleaner Production**, v. 233, p. 918-931, 2019.
- ALEM, G. *et al.* **Compras sustentáveis & grandes eventos: a avaliação do ciclo de vida como ferramenta para decisões de consumo**. São Paulo: Programa Gestão Pública e Cidadania, 2015. 136 p. 2015.
- AMORIM, F. S. *et al.* Produção de briquetes a partir de espécies florestais. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, Pombal, v. 10, n. 4, p. 34-41, 2015.
- ANDRADE, F. S. **O desafio de implementar a gestão estratégica de suprimentos no setor público: o caso do Estado do Rio de Janeiro**. 2016. 74 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Administração Pública) – Escola Brasileira de Administração Pública e de Empresas, Fundação Getúlio Vargas, Rio de Janeiro, 2016.
- ANDRADE, J. C. S.; COSTA, P. Mudança climática, Protocolo de Kyoto e mercado de crédito de carbono: desafios à governança ambiental global. **O&S**, v. 15, n. 45, abr./jun., p. 29-45, 2008.
- ANDRADE, M. T. A. **Estudo da viabilidade de implantação de uma fábrica de briquetes em Lavras da Mangabeira, Ceará**. 2017. 52 f. Dissertação (Mestrado em Sistemas Agroindustriais) – Centro de Ciências e Tecnologia Agroalimentar, Universidade Federal de Campina Grande, 2017.
- ARAÚJO, L. E. S. **Crise hídrica e potencial energético da Região Sudeste**. 2016. 117 f. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica) – Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2016.
- ARAÚJO, Y. R. V. **Avaliação ambiental e previsão dos resíduos da arborização urbana de João Pessoa como alternativa energética**. 2017. 123f. Dissertação (Mestrado em Energias Renováveis) – Universidade Federal da Paraíba, Centro de Energias Alternativas e Renováveis, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14040: Gestão ambiental: avaliação do ciclo de vida: princípios e estrutura**. Rio de Janeiro, 2009. 21 p.
- _____. **NBR ISO 14044: Gestão ambiental: avaliação do ciclo de vida: requisitos e orientações**. Rio de Janeiro, 2009, 46 p.
- BARBOSA JÚNIOR, A. F. *et al.* Conceitos e aplicações de Análise do Ciclo de Vida (ACV) no Brasil. **Rev. Gerenciais**, São Paulo, v. 7, n. 1, p. 39-44, 2008.
- BARDELLINE, J. **Transparency, regulations drive LCA popularity**. 2011. Disponível em: <https://www.greenbiz.com/news/2011/05/17/transparency-regulations-drive-lca-popularity>. Acesso em: 03 mar. 2019.

BLEY JÚNIOR, C. *et al.* **Agroenergia da biomassa residual**: perspectivas energéticas, socioeconômicas e ambientais. 2. ed. Brasília: Itaipu Binacional, 2009. 140 p.

BRASIL. Lei nº 12.187, de 29 de dezembro de 2009. Institui a Política Nacional sobre Mudança do Clima – PNMC e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, 29 dez. 2009. p. 109.

_____. Lei nº 12.305, de 02 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, 03 ago. 2010. p. 2.

_____. GOVERNO DO BRASIL. **Matriz energética**. 2010. Disponível em: <http://www.brasil.gov.br/noticias/meio-ambiente/2010/11/matriz-energetica>. Acesso em: 16 maio 2019.

_____. **Dilma inaugura usina hidrelétrica de Belo Monte**. 2016. Disponível em: <http://www.brasil.gov.br/governo/2016/05/dilma-inaugura-usina-hidreletrica-de-belo-monte/>. Acesso em: 01 jun. 2019.

_____. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Levantamento sobre a geração de resíduos provenientes da atividade madeireira e proposição de diretrizes para políticas, normas e condutas técnicas para promover o seu uso adequado**. 2009. Disponível em: http://www.mma.gov.br/estruturas/164/publicacao/164_publicacao10012011032535.pdf. Acesso em: 01 jun. 2019.

_____. **Biomassa para energia no Nordeste**: atualidade e perspectivas. Brasília: MMA, 2018. 161 p.

_____. MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanço Energético Nacional – 2018**. 2018a. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-303/topico-397/Relat%C3%B3rio%20S%C3%ADntese%202018-ab%202017vff.pdf>. Acesso em: 01 jun. 2019.

_____. **Balanço Energético Nacional 2018**. Rio de Janeiro: EPE, 2018b. 292 p.
CASAGRANDE JUNIOR, E. F. *et al.* Indústria moveleira e resíduos sólidos: considerações para o equilíbrio ambiental. **Revista Educação & Tecnologia**, Curitiba, v. 8, p. 209-228, 2004.

_____. **Balanço Energético Nacional**. Rio de Janeiro: MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2018.

BUENO, C.; RESSIGNOLO, J. A. A avaliação de ciclo de vida (ACV) de sistemas construtivos. In: KAZMIERCZAK, C. S.; FABRICIO, M. M (org.). **Avaliação de desempenho de tecnologias construtivas inovadoras: materiais e sustentabilidade**. Porto Alegre: ANTAC, 2016. 412 p. 2016.

COLTRO, L. (Org.). **Avaliação do ciclo de vida como instrumento de gestão**. Campinas: CETEA/ITAL, 2007. 75 p.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Conjuntura Mensal** – (Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento). 2017. 10 p.

CONDIA, N. E. B.; SILVA, D. A. L.; OMETTO, A. R. Avaliação do ciclo de vida de briquetes feitos de serragem de madeira. *In: CONGRESSO BRASILEIRO EM GESTÃO DO CICLO DE VIDA*, 5., 2016, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza, 2016.

CONSELHO BRASILEIRO DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL. **Projeto avaliação de ciclo de vida modular de blocos e pisos de concreto**. 2014. Disponível em: http://cbcs.org.br/5dotSystem/userFiles/ACV-m/CBCS_ACV-blocos-concreto.pdf. Acesso em: 01 jun. 2019.

CORTEZ, C. L. **Estudo do potencial de utilização da biomassa resultante da poda de árvores urbanas para a geração de energia: estudo de caso: AES Eletropaulo**. 2011. 246 f. Tese (Doutorado em Energia) – EP/ FEA/ IEE/ IF da Universidade de São Paulo, 2011.

DIAS, J. M. C. S. *et al.* **Produção de briquetes e péletes a partir de resíduos agrícolas, agroindustriais e florestais**. Brasília, DF: Embrapa Agroenergia, 2012. 130 p. 2012.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Lify-cycle assessment: inventory guidelines and principles**. 1993. Disponível em: <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi/30003W9K.PDF?Dockkey=30003W9K.PDF>. Acesso em: 01 jun. 2019.

FERREIRA, A. F. B. *et al.* Caracterização energética da fibra da casca do coco com posterior produção de briquete. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA QUÍMICA*, 21., 2016, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza, 2016.

FLORES, N. B.; NOLASCO, L. G. Esterco como fonte de energia renovável. **Rev. Jurídica Direito, Sociedade e Justiça**, v. 7, 2018.

FREITAS, A. J. *et al.* Efeito da pressão e do tempo de compactação nas propriedades de briquetes de resíduos madeireiros de Paricá. **Nativa Sinop**, v. 4, n. 6, p. 380-385, nov./dez., 2016.

FURTADO, T. S. *et al.* Varáveis do processo de briquetagem e qualidade de briquetes de biomassa florestal. **Rev. Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 30, n. 62, p. 101-106, 2010.

GENOVESE, A. L.; UDAETA, M. E. M.; GALVÃO, L. C. R. Aspectos energéticos da biomassa como recurso no Brasil e no mundo. *In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL*, 6., 2006, Campinas. **Anais...** Campinas, São Paulo, 2006.

GINÂNI, T. P. **Estudo preliminar da produção de briquetes compostos a partir de resíduos vegetais**. 2013. 37 f. Monografia (Graduação em Ciência e Tecnologia) – Campus Angicos, Universidade Federal Rural do Semi-Árido, 2013.

GIODA, A.; LEON, A. P. **Queima de lenha e carvão em ambientes fechados. Poluição do ar e riscos para a saúde**. Conselho Consultivo do Sindigás, 2017. 48 p. 2017.

GOMES, V. J. F. O meio ambiente e o risco de apagão no Brasil. *In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL REESTRUTURAÇÃO E REGULAÇÃO DO SETOR DE ENERGIA ELÉTRICA E GÁS NATURAL*, 2., 2007, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro, 2007.

HANSEN, A. P.; SEO, E. S. M.; KULAY, L. A. Identificação de oportunidades de melhoria de desempenho ambiental em processo de produção de materiais cerâmicos via aplicação da técnica de avaliação de ciclo de vida (ACV). **Rev. Produção Online**, v. 10, n. 4, p. 912-936, 2010.

HAUSCHILD, M. Z. Assessing environmental impacts in a life-cycle perspective. **Environmental Science & Technology**, v. 39, n. 4, p. 81-88, 2005.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Características urbanísticas do entorno dos domicílios**. Rio de Janeiro, 2010. 175 p. 2010.

INSTITUTO BRASILEIRO DE INFORMAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA. **Histórico da ACV**. 2015. Disponível em: <http://acv.ibict.br/acv/historico-da-acv/>. Acesso em: 08 mar. 2019.

INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA. **A avaliação de ciclo de vida como ferramenta para a formulação de políticas públicas no Brasil**. Rio de Janeiro: IPEA, 2016. 52 p.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **World Energy Balances 2018**. 2018. Disponível em: <https://webstore.iea.org/world-energy-balances-2018>. Acesso em: 01 jun. 2019.

LASSIO, J. G. G. **Aplicação do programa SIMAPRO na avaliação dos ciclos de vida dos materiais da construção civil: estudo de caso para um conjunto habitacional**. 2013. 96 f. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

LIMA JÚNIOR, C. *et al.* Potencial de aproveitamento energético de fontes de biomassa no Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 7, n. 2, p. 207-221, 2014.

LYRA, C. *et al.* **Poluição em ambientes fechados como fator de risco para a saúde: o uso da lenha como fator agravante**. 2015. Disponível em: http://www.gasescombustiveis.com.br/premioglp/wp-content/uploads/Poluicao_em_Ambientes_Fechados_como_fator_de_risco_para_a_saude.pdf. Acesso em: 03 jun. 2019.

MARTINS, W. A. **Avaliação do ciclo de vida do programa de coleta seletiva do município de João Pessoa-PB, Brasil**. 2017. 112 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal da Paraíba, 2017.

MOREIRA, I. **Conquista: Solução Educacional Positivo - Geografia, 7º ano**. Curitiba: Positivo, v. 2, 2014.

NUNES, J. V. S. *et al.* **Análise da viabilidade do bagaço-de-cana (*Saccharum spp*) para produção de briquetes**. 2017. Disponível em:

http://www.confea.org.br/media/contecc2017/agronomia/3_advdbsspapdb.pdf. Acesso em: 16 maio 2019.

OMETTO, A.; TACHARD, A. L. Gestão ambiental do ciclo de vida do produto: a ferramenta “Avaliação do Ciclo de Vida”. In: PIMENTA, H. C. D.; GOUVINHAS, R. P. (Org.)

Ferramentas de gestão ambiental: competitividade e sustentabilidade. Natal: Editora do CEFET-RN, 2007. p. 36-56.

OLIVEIRA, G. C.C.C. **Avaliação do ciclo de vida da produção de biomassa torrefada para a gaseificação.** 2013. 78f. Dissertação (Mestrado em Ciências Mecânicas) – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2013.

OSHIRO, T. L. **Produção e caracterização de briquetes produzidos com resíduos lignocelulósicos.** 2016. 78 f. Monografia (Graduação em Engenharia Ambiental) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina, 2016.

PACHECO, R. C. **Energia eólica e hidrelétrica na matriz elétrica brasileira: análise sob a ótica da economia ecológica.** 2016. 71 f. Monografia (Graduação em Ciências Econômicas) – Universidade Federal do Pampa, Santana do Livramento, 2016.

PAULA, L. E. R. *et al.* Produção e avaliação de briquetes de resíduos lignocelulósicos. **Rev. Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 31, n. 66, p. 103-112, 2011.

PEREIRA, F. S. G. **Viabilidade sustentável de biomassas de *Moringa oleifera* para produção de biodiesel e briquetes.** 2015. 141 f. Tese (Doutorado em Química) – Departamento de Química Fundamental, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2015.

PETRICOSKI, S. M. **Briquetes produzidos com mistura de podas urbanas, glicerina e resíduos de processamento de mandioca.** 2017. 83 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Energia na Agricultura) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, 2017.

PINTO, Q. M. A. **Análise do desempenho energético de briquetes de resíduos agroindustriais gerados no Distrito Federal.** 2016. 51 f. Monografia (Graduação em Engenharia Florestal) – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, 2016.

RODRIGUES, P. R. B. *et al.* Estudo do potencial de reutilização dos resíduos de poda do município de Palmas – TO. **Rev. Engenharia Ambiental**, v. 13, n. 1, p. 144-154, 2016.

ROUSSET, P. *et al.* LCA of Eucalyptus wood charcoal briquetes. **Journal of Cleaner Production**, v. 19, p. 1647-1653, 2011.

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

SANTOS, A. P. D.; FERNANDES, D. S. Análise do impacto ambiental gerados no ciclo de vida de um tecido de malha. **Iberoamerican of Industrial Engineering**, Florianópolis, v. 4, n. 7, p. 1-17, 2012.

SANTOS, J. O. *et al.* Produção e utilização de briquetes no Brasil. **Revista Brasileira de Agrotecnologia**, Garanhuns, v. 5, n. 1, p. 36-40, jan./dez., 2015.

SANTOS, R. C. *et al.* Potencial de briquetagem de resíduos florestais da região do Seridó, no Rio Grande do Norte. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 31, n. 68, p. 285-294, out./dez., 2011.

SFEIR, T. A. **Avaliação do ciclo de vida da produção de pellets de madeira utilizando o Software Livre OpenLCA**. 2013. 49 f. Monografia (Graduação em Engenharia Industrial Madeireira) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

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

SILVA, A. F. G. **Avaliação econômica, produtiva e ambiental dos e combustíveis fósseis do Estado do Ceará em comparação ao briquete**. 2015. 61 f. Monografia (Engenharia de Petróleo) – Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal do Ceará, 2015.

UDO DE HAES, H. A. *et al.* Three strategies to overcome the limitations of life-cycle assessment. **Journal of Industrial Ecology**, v. 8, n. 3, p. 19-32, 2004.

VALE, A. T. *et al.* Caracterização energética e rendimento da carbonização de resíduos de grãos de café (*Coffea arábica*, L) e de madeira (*Cedrelinga catenaeformis*), DUKE. **Cerne**, Lavras, v. 13, n. 4, p. 416-420, out./dez., 2007.

ZAGO, E. S. *et al.* O processo de briquetagem como alternativa de sustentabilidade para as indústrias madeireiras do município de Aripuanã-MT. **Revista TechnoEng.**, v. 1, jul./dez., 2010.

APÊNDICE A – INVENTÁRIO

Processo 1 - PODA NA RUA

PARÂMETROS	Dado Bruto	Uni / ano	Unidade Funcional (Uni / ton. de Bri- quete produzido)	Uni	Comentários
FLUXOS DE ENTRADAS					
ESFERA TECNOLÓGICA (MATERIAIS)					
Motosserra "Chainsawing"	622.474,205	min	34,5819003	min	Entradas e emissões inclusas no inventário da ECOINVENT
Transporte	883.829,465	km	49,10163695	tkm	Entradas e emissões inclusas no inventário da ECOINVENT
FLUXOS DE SAÍDAS					
SAÍDA PRICIPAL					
Madeira podada	22.750		1,26389	ton	Saída calculada com base em informações dispostas pelo fabricante
EMISSIONES					
Emissões para o ar					
Pelo corte, e aumento da superfície de contato					
- Água (evapotranspiração)	1516,667	ton	0,084259	ton	Valor calculado com base em estimativas

Processo 1.1 - PODA NA RUA - CEE*, PREF*, EMP.PODA*

PARÂMETROS	Dado Bruto	Uni / ano	Unidade Funcional (Uni / ton. de Bri- quete produzido)	Uni	Comentários
FLUXOS DE ENTRADAS					
ESFERA TECNOLÓGICA (MATERIAIS)					
Motosserra "Chainsawing"	171009,397	min	9,50052	min	Entradas e emissões inclusas no inventário da ECOINVENT
Transporte	242810,293	km	13,48946	tkm	Entradas e emissões inclusas no inventário da ECOINVENT
FLUXOS DE SAÍDAS					
SAÍDA PRICIPAL					

Madeira podada - CEE*, PREF*, EMP.PODA*	6.250	ton	0,34722	ton	Saída calculada com base em informações dispostas pelo fabricante
---	-------	-----	---------	-----	---

EMISSIONES

Emissiones para o ar

Pelo corte, e aumento da superfície de contato

- Água (evapotranspiração)	416,667	ton	0,02315	ton	Valor calculado com base em estimativas
----------------------------	---------	-----	---------	-----	---

Processo 2 - PICAGEM

PARÂMETROS	Dado Bruto	Uni / ano	Unidade Funcional (Uni / ton. de Briquete produzido)	Uni	Comentários
FLUXOS DE ENTRADAS					
ESFERA TECNOLÓGICA (MATERIAIS)					
Madeira podada	22.750	ton	1,26389	ton	Entrada calculada com base em informações dispostas pelo fabricante
ESFERA TECNOLÓGICA (COMBUSTÍVEIS)					
Diesel	26,12	ton	0,00145	ton	Valor calculado com base no consumo da máquina em litros/hora
ESFERA TECNOLÓGICA (ELETRICIDADE)					
Energia Elétrica	220649,63	kWh	12,25831	kWh	Entradas e emissões inclusas no inventário da ECOINVENT
FLUXOS DE SAÍDAS					

SAÍDA PRICIPAL

Madeira picada	21.000	ton	1,16667	ton	Saída calculada com base em informações dispostas pelo fabricante
----------------	--------	-----	---------	-----	---

EMISSIONES

Emissiones para o ar

Oriundos da queima de combustíveis fósseis

- Dióxido de Carbono	105548,40	kg	5,8638000000	kg	Schlegel et al. (2016)
- Monóxido de Carbono	28,2863	kg	0,0015714636	kg	Schlegel et al. (2016)
- Dióxido de Nitrogênio	2,7248	kg	0,0001513800	kg	Schlegel et al. (2016)
- Monóxido de Nitrogênio	1,7630	kg	0,0000979446	kg	Schlegel et al. (2016)
- Dióxido de Enxofre	1,0113	kg	0,0000561846	kg	Schlegel et al. (2016)

Pelo corte, e aumento da superfície de contato

- Água (evapotranspiração)	1750	ton	0,09722	ton	Valor calculado com base em estimativas
----------------------------	------	-----	---------	-----	---

Processo 2.1 - PICAGEM - CEE*, PREF*, EMP.PODA*

PARÂMETROS	Dado Bruto	Uni / ano	Unidade Funcional (Uni / ton. de Bri- quete produzido)	Uni	Comentários
FLUXOS DE ENTRADAS					
ESFERA TECNOLÓGICA (MATERIAIS)					
Madeira podada - CEE*, PREF*, EMP.PODA*	6.250	ton	0,34722	ton	Entrada calculada com base em informações dispostas pelo fabricante
ESFERA TECNOLÓGICA (COMBUSTÍVEIS)					
Diesel	7,46	ton	0,00041	ton	Valor calculado com base no consumo da máquina em litros/hora
FLUXOS DE SAÍDAS					
SAÍDA PRICIPAL					
Madeira picada - CEE*, PREF*, EMP.PODA*	6.000	ton	0,33333	ton	Saída calculada com base em informações dispostas pelo fabricante
EMISSIONES					
Emissões para o ar					
Oriundos da queima de combustíveis fósseis					
- Dióxido de Carbono	30156,78200	kg	1,675376778	kg	Schlegel et al. (2016)
- Monóxido de Carbono	8,08184	kg	0,000448991	kg	Schlegel et al. (2016)
- Dióxido de Nitrogênio	0,50372	kg	2,79843E-05	kg	Schlegel et al. (2016)
- Monóxido de Nitrogênio	0,77853	kg	4,32516E-05	kg	Schlegel et al. (2016)
- Dióxido de Enxofre	0,28895	kg	1,60528E-05	kg	Schlegel et al. (2016)
Pelo corte, e aumento da superfície de contato					
- Água (evapotranspiração)	250	ton	0,01389	ton	Valor calculado com base em estimativas

Processo 3 - MOAGEM

PARÂMETROS	Dado Bruto	Uni / ano	Unidade Funcional (Uni / ton. de Bri- quete produzido)	Uni	Comentários
FLUXOS DE ENTRADAS					
ESFERA TECNOLÓGICA (MATERIAIS)					
Madeira picada	21.000	ton	1,16667	ton	Entrada calculada com base em informações dispostas pelo fabricante
Madeira picada - CEE*, PREF*, EMP.PODA*	6.000	ton	0,33333	ton	Entrada calculada com base em informações dispostas pelo fabricante
Outros não identificados	360	ton	0,02000	ton	Entrada calculada com base em informações dispostas pelo fabricante
ESFERA TECNOLÓGICA (ELETRICIDADE)					
Energia Elétrica	264.779,55	kWh	14,70997	kWh	Entradas e emissões inclusas no inventário da ECOINVENT
FLUXOS DE SAÍDAS					
SAÍDA PRICIPAL					
Madeira moída	25.421	ton	1,41228	ton	Saída calculada com base em informações dispostas pelo fabricante
EMISSIONES					
Emissões para o ar					
Pelo corte, e aumento da superfície de contato - Água (evapotranspiração)	1.939	ton	0,10772	ton	Valor calculado com base em estimativas

Processo 4.1 - SECAGEM AO SOL

PARÂMETROS	Dado Bruto	Uni / ano	Unidade Funcional (Uni / ton. de Bri- quete produzido)	Uni	Comentários
FLUXOS DE ENTRADAS					
ESFERA TECNOLÓGICA (MATERIAIS)					
Madeira Moída	13.549,42	ton	0,75275	ton	Entrada calculada com base em informações dispostas pelo fabricante
Serrarias (saw dust)	1.599	ton	0,08883	ton	Entrada calculada com base em informações dispostas pelo fabricante
FLUXOS DE SAÍDAS					
SAÍDA PRICIPAL					

Madeira seca ao sol	9.600	ton	0,53333	ton	Saída calculada com base em informações dispostas pelo fabricante
---------------------	-------	-----	---------	-----	---

EMISSIONES

Emissões para o ar

Pelo corte, e aumento da superfície de contato

- Água (evapotranspiração)	5.548,42	ton	0,30825	ton	Valor calculado com base em estimativas
----------------------------	----------	-----	---------	-----	---

Processo 4.2 - SECAGEM À ENERGIA ELÉTRICA

PARÂMETROS	Dado Bruto	Uni / ano	Unidade Funcional (Uni / ton. de Bri- quete produzido)	Uni	Comentários
------------	------------	-----------------	--	-----	-------------

FLUXOS DE ENTRADAS

ESFERA TECNOLÓGICA (MATERIAIS)

Madeira Moída	11.871,63	ton	0,659535	ton	Entrada calculada com base em informações dispostas pelo fabricante
---------------	-----------	-----	----------	-----	---

Serrarias (saw dust)	1.401	ton	0,077833333	ton	Entrada calculada com base em informações dispostas pelo fabricante
----------------------	-------	-----	-------------	-----	---

ESFERA TECNOLÓGICA (ELETRICIDADE)

Energia Elétrica	33980,0422	kWh	1,887780124	kWh	Entradas e emissões incluídas no inventário da ECOINVENT
------------------	------------	-----	-------------	-----	--

FLUXOS DE SAÍDAS

SAÍDA PRINCIPAL

Madeira seca à energia elétrica	8.400	ton	0,466666667	ton	Saída calculada com base em informações dispostas pelo fabricante
---------------------------------	-------	-----	-------------	-----	---

EMISSIONES

Emissões para o ar

Pelo corte, e aumento da superfície de contato

- Água (evapotranspiração)	4.872,63	ton	0,270701667	ton	Valor calculado com base em estimativas
----------------------------	----------	-----	-------------	-----	---

Processo 4 - SECAGEM TOTAL

PARÂMETROS	Dado Bruto	Uni / ano	Unidade Funcional (Uni / ton. de	Uni	Comentários
------------	------------	-----------------	--	-----	-------------

Briquete produzido)					
FLUXOS DE ENTRADAS					
ESFERA TECNOLÓGICA (MATERIAIS)					
Madeira seca ao sol	9.600	ton	0,53333	ton	Entrada calculada com base em informações dispostas pelo fabricante
Madeira seca à energia elétrica	8.400	ton	0,46667	ton	Entrada calculada com base em informações dispostas pelo fabricante
FLUXOS DE SAÍDAS					
SAÍDA PRICIPAL					
Madeira seca	18.000	ton	1	ton	Saída calculada com base em informações dispostas pelo fabricante

Processo 5 - BRIQUETAGEM					
PARÂMETROS	Dado Bruto	Uni / ano	Unidade Funcional (Uni / ton. de Briquete produzido)	Uni	Comentários
FLUXOS DE ENTRADAS					
ESFERA TECNOLÓGICA (MATERIAIS)					
Madeira seca	18.000	ton	1	ton	Entrada calculada com base em informações dispostas pelo fabricante
ESFERA TECNOLÓGICA (ELETRICIDADE)					
Energia Elétrica	556.037,06	kWh	30,89095	kWh	Entradas e emissões inclusas no inventário da ECOINVENT
FLUXOS DE SAÍDAS					
SAÍDA PRICIPAL					
Briquete produzido	18.000	ton	1	ton	Saída calculada com base em informações dispostas pelo fabricante