UNIVERSIDADE DA INTEGRAÇÃO INTERNACIONAL DA LUSOFONIA AFRO-BRASILEIRA
INSTITUTO DE ENGENHARIAS E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ENERGIAS

DIANA CEITA DA ENCARNAÇÃO DA CRUZ

AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DA PRODUÇÃO DE BRIQUETES DE CASCA DE COCO UTILIZANDO SOFTWARE OPENLCA

REDENÇÃO
2026

DIANA CEITA DA ENCARNAÇÃO DA CRUZ

AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DE PRODUÇÃO DE BRIQUETES DE CASCA DE COCO UTILIZANDO SOFTWARE OPENLCA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia de Energias da Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira, como requisito parcial à obtenção do grau de bacharel em Engenharia de Energias.

Orientadora: Profa. Dra. Ada Amélia Sanders Lopes.

REDENÇÃO

2026

Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira
Sistema de Bibliotecas da UNILAB
Catalogação de Publicação na Fonte.

Cruz, Diana Ceita da Encarnação da.

C957a

Avaliação do ciclo de vida da produção de briquetes de casca de coco utilizando software openlca / Diana Ceita da Encarnação da Cruz. - Redenção, 2026.
49f: il.

Monografia - Curso de Engenharia De Energias, Instituto De Engenharias E Desenvolvimento Sustentável, Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira, Redenção, 2026.

Orientador: Profa. Dra. Ada Amélia Sanders Lopes.

1. Produtos e serviços - Avaliação do Ciclo de Vida (ACV). 2. Briquete de casca de coco (Cocos nucifera). 3. Software OpenLCA. I. Título

CE/UF/BSCA CDD 000

DIANA CEITA DA ENCARNAÇÃO DA CRUZ

AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DE PRODUÇÃO DE BRIQUETES DE CASCA DE COCO UTILIZANDO SOFTWARE OPENLCA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação do Curso de Engenharia de Energias, do Instituto de Engenharias e Desenvolvimento Sustentável da Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira, como requisito parcial para a obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Energias.

Aprovada em: 08 / 06 / 2026

BANCA EXAMINADORA

gov.br Documento assinado digitalmente
ADA AMELIA SANDERS LOPES
Data: 22/06/2026 17:38:44-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Profa. Dra. Ada Amélia Sanders Lopes (Orientadora)
Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (Unilab)

gov.br Documento assinado digitalmente
JOSE CLEITON SOUSA DOS SANTOS
Data: 22/06/2026 21:20:20-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof. Dr. José Cleiton Sousa dos Santos
Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (Unilab)

gov.br Documento assinado digitalmente
SABI YARI MOISE BANDIRI
Data: 23/06/2026 14:58:28-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof. Dr. Sabi Yari Moïse Bandiri
Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE)

EVELINE CUNHA LIMA:51059150387
Assinado de forma digital por EVELINE CUNHA LIMA:51059150387
Dados: 2026.06.22 19:58:09 -03'00'

Me. Eveline Cunha Lima
Universidade Federal do Ceará (UFC)

CamScanner

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu bom Deus pela vida e pelas vicissitudes presentes nela, por me amparar, proteger e direcionar.

A minha mãe, Maria de Fátima, minha heroína que luta, com unhas e dentes, para a construção de quem sou hoje, pelo seu amor incondicional e apoio em todos os sentidos.

A minha irmã, Tatcher, meu anjo da guarda aqui na Terra.

A minha avó, Titi, minha segunda mãe, que me encheu de carinhos e cuidados imensos.

A minha orientadora, professora Dra Ada Amelia Sanders Lopes, por acreditar no meu potencial, pela sugestão do tema, orientações, diretrizes e disponibilidade, que foram indispensáveis para o desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço fielmente os professores: Silvia Helena, Ada Amelia, Rita Karolinny, Janaina, Maria Cristiane, Caceres, Artemis, Sabi, Cleiton, Alisson. A todos os professores do curso de Engenharia de Energias da Unilab, pelos ensinamentos partilhados, essenciais para a minha formação acadêmica e profissional.

A todos os meus queridos colegas do curso em especial, o Adulai, o Delício, o João Álvaro e o Muanangani, agradeço-vos fervorosamente por me acompanharem amigavelmente nesta grande etapa.

À UNILAB e ao IEDS que me proporcionam oportunidades inimagináveis.

Ao Grupo de Extensão e Pesquisa em Energias e Meio Ambiente (GEPEMA), por ter sido o elo fundamental para o meu crescimento e desempenho nas pesquisas.

À Genifre, Jennyfer, Jessica, José, Laurindo e Lourenço pelo apoio indescritível durante o percurso.

Ao Grupo de Pesquisa e Extensão, Unilab Student Chapter, que foi extremamente enriquecedor na minha jornada.

E a todos que direta ou indiretamente foram cruciais para a minha vida, os meus sinceros agradecimentos.

"Eis que eu estou contigo, e te guardarei por onde quer que fores, e te farei voltar a esta terra, porque te não desampararei, até cumprir eu aquilo que te hei referido. "

Gênesis 28:15

RESUMO

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é uma metodologia qualitativa e quantitativa que permite realizar a análise de todo ciclo de vida de um produto ou serviço, desde a extração da matéria-prima até o descarte final. Nesse sentido, a ACV de produção de briquetes de casca de coco no maciço de Baturité-Ce, identificou o potencial de aquecimento global como a categoria de impacto predominante através do software livre OpenLCA versão 2.6.0, pelo método ReCiPe midpoint 2016 (H). Considerou a unidade funcional de 1kg de briquete de casca de coco, com a abordagem *Gate-to-Gate*. Apesar da limitação do banco de dados regional, adaptou-se o banco de dados SICV Brasil de modo a representar o mix de eletricidade de baixa tensão do Ceará. A etapa de caracterização da análise imediata, contribuiu para maior impacto concernente ao consumo de eletricidade, assim, o impacto total foi de 1,180 $Kg\ CO_2$- eq. O briquete de casca de coco apresentou características físico-químicas adequadas, isto é, poder calorífico superior 18,53 MJ/Kg, carbono fixo 19,41 %, teor de umidade 9,10 % $\pm$ 0,20, teor de cinzas 5,50 % $\pm$ 0,09 e teor de materiais voláteis de 75,09 % $\pm$ 1,14. Dessa forma, a produção de briquetes de casca de coco configura-se como uma alternativa tecnológica com potencial de substituição do carvão vegetal, contribuindo para a redução de impactos ambientais associados ao uso de combustíveis fósseis de origem florestal. Além disso, apresenta características favoráveis de manuseio, transporte e armazenamento, o que pode favorecer sua inserção em cadeias produtivas e regionais.

Palavras-chave: ACV; Briquete; Casca de coco; OpenLCA.

ABSTRACT

Life Cycle Assessment (LCA) is a qualitative and quantitative methodology that allows for an analysis of the entire life cycle of a product or service, from raw material extraction to final disposal. In this sense, the LCA of coconut husk briquette production in the Baturité massif, Ceará, considered global warming potential as the predominant impact category using the free software OpenLCA version 2.6.0, by the ReCiPe midpoint 2016 (H) method. A functional unit of 1 kg of coconut husk briquette was considered, using a Gate-to-Gate approach. Despite the limitations of the regional database, the SICV Brasil database was adapted to represent the low-voltage electricity mix of Ceará. The characterization stage of the immediate analysis contributed to a more concerning impact on electricity consumption; thus, the total impact was 1,180 kg CO2-eq. The coconut husk briquette presented adequate physicochemical characteristics, that is, higher heating value of 18.53 MJ/Kg, fixed carbon 19.41%, moisture content 9.10% ± 0.20, ash content 5.50% ± 0.09 and volatile matter content of 75.09% ± 1.14. Thus, the production of coconut husk briquettes is configured as a technological alternative with the potential to replace charcoal, contributing to the reduction of environmental impacts associated with the use of fossil fuels of forest origin. In addition, it presents developed transport and storage characteristics, which can favor its insertion in productive and regional chains.

Keywords: LCA; Briquette; Coconut husk; OpenLCA.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Estrutura de coco verde in natura 17
Figura 2 - Fluxograma de produção de briquetes.....19
Figura 3 - Prensa Hidráulica.....28
Figura 4 - Instrumentos de medição de consumo energético.....28
Figura 5 - Mix Elétrico de Baixa Tensão de Ceará.....30
Figura 6 - - Briquetes de casca de coco 33
Figura 7 - Fluxograma de ACV.....35
Figura 8 - Resultado de ACV pelo método ReCiPe Midpoint 2016 (H) para 1kg de briquete de casca de coco.....36
Figura 9 -Contribuição das fontes energéticas para as emissões CO_2.....37
Figura 10- Percentagens das etapas 38

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Caracterização físico-química de casca de coco verde e endocarpo de coco seco 18
Tabela 2- Consumo energético dos equipamentos 28
Tabela 3- Dados para construção de inventário do Mix regional.....30
Tabela 4- Inputs/ outputs de Processo 1 Coleta 31
Tabela 5-Inputs/ Outputs de produção de Briquetes de casca de coco 31
Tabela 6- Caracterização físico-químico de briquete de casca de coco.....32

LISTA DE ABREVIATURAS E SIMBOLOS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABREMA	Associação Brasileira de Resíduos e Meio Ambiente
ACV	Avaliação do Ciclo de Vida
ACVS	Ciclo de Vida Social
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ASTM	Sociedade Americana para Testes e Materiais
BEN	Balanço Energético Nacional
CCV	Custo do Ciclo de Vida
CE	Ceará
EMBRAPA	Empresa de Brasileira de Pesquisa Agropecuária
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
GANA	Grupo de Apoio à Normalização Ambiental
GEE	Gases de Efeito Estufa
IBICT	Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia
ICV	Inventário do Ciclo de Vida
IPCC	Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas
ISO	Organização Internacional de Padronização
NBR	Norma Brasileira
ONS	Operador Nacional de Sistema Elétrico
SICV	Banco Nacional de Inventário do Ciclo de Vida

LISTA DE SÍMBOLOS

CH_4	Metano
CO_2	Dióxido de Carbono
±	Mais ou Menos

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO **13**

1.1 OBJETIVOS 15

1.1.1 Objetivo geral *15*

1.1.2 Objetivos específicos *15*

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA **16**

2.1 BIOMASSA 16

2.2 CASCA DE COCO 17

2.3 BRIQUETE 19

2.4 MATRIZ ENERGÉTICA DO NORDESTE 19

2.5 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (ACV) 20

2.6. SOFTWARE OPENLCA 22

2.7 SICV BRASIL 23

2.8 POTENCIAL DE AQUECIMENTO GLOBAL 23

3 METODOLOGIA **24**

3.1 COLETA DAS AMOSTRAS 24

3.2 SECAGEM 24

3.3 TRITURAÇÃO DA BIOMASSA 24

3.4 DETERMINAÇÃO DA ANÁLISE IMEDIATA DA BIOMASSA 25

3.4.1 Teor de Umidade e Sólidos totais (NBR 16550) *25*

3.4.2 Teor de Materiais Voláteis (ASTM D3175) *25*

3.4.3 Teor de Cinzas e, por diferença, o Teor de Carbono Fixo (NBR 16550) *26*

3.4.4 Determinação do poder calorífico superior da biomassa *27*

3.5 PRODUÇÃO DO BRIQUETE 27

3.6 MEDIÇÃO DO CONSUMO ENERGÉTICO DOS EQUIPAMENTOS 28

3.7 MODELAGEM DA AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA NO OPENLCA 29

3.7.1 Definição do objetivo e escopo do estudo *29*

3.7.2 Inventário do ciclo de Vida *29*

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO **32**

4.1 ANÁLISE IMEDIATA 32

4.1.1 Teor de Umidade e Sólidos totais (NBR 16550) *33*

4.1.2 Teor de Materiais Voláteis (ASTM D3175) *33*

4.1.3 Teor de Cinzas e, por diferença, o Teor de Carbono Fixo (NBR 16550) *34*

4.1.4 Determinação do poder calorífico superior da biomassa *34*

4.2 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA 35

4.2.1 Avaliação do Impacto *35*

4.2.2 Interpretação *38*

5 CONCLUSÃO **40**

REFERÊNCIAS **42**

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos tempos, a geração de resíduos sólidos provenientes da biomassa de casca de coco e outros resíduos agrícolas e florestais têm aumentado drasticamente, principalmente nas grandes cidades litorâneas. Segundo a Associação Brasileira de Resíduos e Meio Ambiente-ABREMA, em 2022 foram gerados cerca de 77,1 milhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos. No entanto, a taxa de aproveitamento desses resíduos, particularmente da casca de coco, é muito baixa, uma vez que, Sindicoco (2023) esclarece que apenas 10% do que é gerado é aproveitado, apesar de existir a Política Nacional de Resíduos Sólidos regulamentada pela Lei nº 12.305/2010 e atualizada pelo decreto nº 10.936/2022 (BRASIL, 2022).

O Brasil é o quarto maior produtor mundial de coco in natura (FAO, 2025), com uma produção que atinge cerca de 2,9 milhões de toneladas anuais. A região Nordeste, especificamente o Ceará, está no ranking dos maiores produtores ao nível nacional, em seguida de Bahia, Pará e Sergipe (MARTINS, 2025), devido suas características peculiares como o clima e solo adequados, bem como a sazonalidade da biomassa. De acordo com a Embrapa (2020), os lixos coletados nos grandes centros urbanos correspondem a 70% de casca de coco. Visto que, a maior parte da produção dedica-se exclusivamente à indústria de água, leite, óleo de coco, coco ralado e sobremesas e todo o resto é descartado, (VANESSA, 2015).

Por outra, os Resíduos Sólidos Urbanos não são facilmente biodegradáveis, uma vez que, a casca de coco demora em média 12 anos para se decompor (SOUSA et al., 2023). Por conseguinte, ocasiona sérios problemas ambientais como odor, inundações, incêndios ocasionais, degradação paisagística, e contribui para a proliferação de insetos e vetores, incluindo o mosquito *Aedes aegypti*, contribuindo para o agravamento da saturação de lixões e aterros sanitários, além da emissão de metano (CH_4) como um dos principais gases do efeito estufa (DIAS et al., 2019).

Nesta ótica, a gestão de resíduos sólidos tem sido alvo de preocupações e debates, de modo a mitigar esses problemas e obter soluções viáveis e sustentáveis no que concerne ao aspecto ambiental, económico e social. Apesar de existirem projetos sociais e empreendedores que reutilizam e reciclam a casca de coco, a fim de resultar em novos produtos como substratos, adubos orgânicos, vasos, placas, roupas, almofadas, entre outros, ainda assim, não é suficiente.

Nessa vertente, a produção de briquetes surgiu como uma tecnologia promissora de conversão energética, que permite reaproveitar esses resíduos lignocelulósicos, já que eles são matérias-primas abundantes e ricas em carbono, indispensáveis para a produção de energia. Um ponto a se destacar, é que o aproveitamento desses resíduos intensifica a não dependência por combustíveis fósseis, que são responsáveis pela emissão dos Gases de Efeito de Estufa (GEE).

De acordo com a matriz energética brasileira, o país apresenta um diferencial, uma vez que, possui elevada participação das fontes de energias renováveis e limpas, cerca de de 50% (EPE, 2025) com destaque a hidrelétrica, a eólica, a solar, a biomassa, além do potencial da produção do hidrogênio verde. O Plano Decenal de Expansão de Energia 2024 enfatiza essa necessidade de diversificação (EPE, 2024).

Os resíduos lignocelulósicos que foram utilizados no presente trabalho têm origem na Macrorregião de Baturité, também amplamente conhecida como Maciço de Baturité. O foco é investir em tecnologias de caracterização e compactação da biomassa, como a briquetagem, o que torna estratégico para aumentar a densidade energética desses resíduos, viabilizando seu uso eficiente em caldeiras e sistemas térmicos industriais, e promovendo o desenvolvimento sustentável regional.

Para avaliar o impacto desses briquetes de casca de coco, foi realizada a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), que é uma estrutura científica estabelecida e uma medida de sustentabilidade dos impactos ambientais de um processo, serviço ou produto (SAXENA, 2009, ESCOBAR, 2009), associados a todas as etapas, desde a coleta da matéria-prima até o produto final, definida pelas normas da International Organization for Standardization (ISO 14040 e 14044). A ACV fornece subsídios técnicos essenciais para decisões que visam práticas mais sustentáveis e a redução dos danos ambientais (ISO, 2020; UBANDO, 2019). Seu uso tem crescido tanto na indústria quanto em pesquisas acadêmicas, especialmente em projetos voltados para energias renováveis e valorização de resíduos (FAN, 2011).

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

O objetivo deste trabalho é estudar a viabilidade da casca de coco do Maciço de Baturité (CE) como fonte de energia sustentável e biocombustível para a região.

1.1.2 Objetivos específicos

a) Construir inventário do ciclo de vida de produção de briquetes de casca de coco;
b) Avaliar o ciclo de vida dos sistemas energéticos, considerando os impactos ambientais, sociais, e os recursos energéticos no contexto da região;
c) Utilizar o software OpenLCA como ferramenta de análise de impacto de ciclo de vida desde a coleta, secagem, trituração até o processo de prensagem, por meio do método ReCiPe Midpoint 2016 (H) com a abordagem "do portão ao portão" (Gate-to-Gate).

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Biomassa

A biomassa é considerada uma fonte geradora de energia limpa e renovável (BEZERRA et al., 2017), que tem se desenvolvido potencialmente nos últimos anos e contribuindo para a diversificação da matriz energética brasileira. Classifica-a como todo o material orgânico, de origem animal ou vegetal como bagaço de cana-de-açúcar, casca de milho, coco, macaxeira, amendoim, arroz, palhas, óleos vegetais e dejetos animais (SEYE, 2003).

Desde os primórdios da humanidade, ela sempre esteve presente como fonte energética através da lenha e carvão (PETRICOSKI, 2017). Só a partir do século XX surgiu novas formas da sua utilização. Desse modo, através de processos de conversão física, química e biológica como combustão direta, gaseificação, pirólise, hidrólise, digestão anaeróbica, hidrogenação ou fermentação tem-se diversificado a sua utilização (CHEN; XING; HAN, 2009).

Assim, agrupa-se em dois tipos: a biomassa tradicional, proveniente de lenhas e resíduos naturais e a biomassa moderna, originada por meio de processos tecnológicos eficientes como biocombustíveis líquidos, gasosos, e sólidos como briquetes e pellets (MARAFON et al., 2019).

Destaca-se inúmeras vantagens da utilização da biomassa para geração energética, que vai desde a substituição de combustíveis fósseis e consequentemente a redução de emissão de gases efeito de estufa e a diminuição de desmatamento, benéficas para o meio ambiente, até a geração de empregos, principalmente nos países em desenvolvimento e nas regiões que apresentam maior demanda energética, e assim potencializar a economia local (PETRICOSKI, 2017).

O Brasil destaca-se como um gigante agrícola e florestal no cenário global, gerando um volume colossal de resíduos lignocelulósicos e coprodutos industriais cujo potencial de produção primária de biomassa é expressivo na transição energética nacional (EPE, 2025). Por um lado, esses resíduos têm baixa densidade, baixo poder calorífico e alto teor de umidade, além de exigir altos custos de transporte e armazenamento devido ao seu volume. Por outro lado, eles têm alta potencialidade de serem aproveitados através da conversão em briquetes e ou pellets, aumentando assim a sua densidade. Os resíduos de cana-de-açúcar, coco, feijão, amendoim, mandioca, cacau, cavaco, palhas de soja e milho, casca de arroz, café, entre outros, são os mais utilizados para a geração de energia no Brasil.

2.2 Casca de Coco

O coco é um fruto tropical do coqueiro, *Cocos nucifera L.*, no qual sua estrutura é formada por epicarpo, mesocarpo, endocarpo, copra e água de coco.

Figura 1 - Estrutura de coco verde in natura



Fonte: MATTOS, 2011

Atualmente, o Brasil produz cerca de 8,1 bilhões de unidades de frutos de Cocos nucifera (MEIRIELE et al., 2025) e o Nordeste é responsável por 70% dessa produção. Dados de 2020 apontam que ao nível nacional foram descartados aproximadamente 3 milhões de resíduos do fruto (MARAFON, 2020). Entretanto, as informações são imprecisas quanto a quantidade de casca de coco verde descartada por ano no local que foi consumida (SANTOS et al., 2019). O mesocarpo representa 80 a 85% do peso bruto do coco, assim, 70 % da casca de coco seca contém as fibras e o restante é pó (TAQUIDIR, 2024). Esse resíduo tem alto teor de lignina comparado a outras fibras naturais como casca de arroz, visto que possui duas vezes mais. Pelo fato de ter quantidades consideráveis de lignina, isso faz com que o poder calorífico seja alto devido ao maior grau de oxidação. Para (MARAFON et al., 2019) essas caraterísticas químicas são indispensáveis para a boa qualidade de produção de biocombustíveis sólidos. Portanto, a reutilização dos resíduos de casca de coco torna-se uma alternativa promissora no aspecto ambiental, econômico e social, a fim de gerar energia e diversificar a matriz energética. Ademais, dependendo da variedade do coco, o seu uso torna-se viável, pois, devido às proporções adequadas de celulose (35 a 47%), hemicelulose (15 a 28%) e lignina (16 a 45%) e com teor de cinzas reduzida (2,7 a 10%) (POLLARD et al, 1992; VAN DAM, et al, 2006; BILBA et al, 2007; BRÍGIDA et al, 2010; e VAITHANOMSAT et al, 2011).

A Tabela 1 demonstra a caracterização físico-química de casca de coco verde e endocarpo de coco seco de acordo com a literatura.

Tabela 1- Caracterização físico-química de casca de coco verde e endocarpo de coco seco

Características	Casca (fibra + pó)	Endocarpo
Carbono (%)	43,3	48,7
Hidrogênio (%)	5,35	5,56
Nitrogênio (%)	0,46	0,34
Relação C/N	94,3	143,2
Celulose (%)	35,52	42,91
Hemicelulose (%)	33,41	16,76
Lignina (%)	22,28	30,95
Cinzas (%)	7,70	1,31

Fonte adaptado: Rio Largo et al, 2014

O coco tem inúmeras aplicações, nomeadamente: ornamentação, vasos, tapetes, mantas, construção civil, painéis de cimento, substrato, carvão vegetal, briquetes, pellets, produção de bioetanol, biodiesel, biogás, produção de nanopartículas de magnetita, anti-inflamatório e alimentação. Útil nas usinas de geração de calor ou vapor, fogões, fornos industriais, churrasqueiras, padarias e para o aquecimento das piscinas, atenuando assim a dependência de combustíveis fósseis.

2.3 Briquete

A produção de briquetes é uma prática muito antiga, inventada desde o início do século XIX conforme (OLIVEIRA FILHO; SILVA, 2022) aponta. Considerada como uma tecnologia de compactação, onde a biomassa é submetida a uma prensa a alta pressão e ou temperatura, com o propósito de aumentar a densidade e a homogeneidade (TAQUIDIR, 2024). A compactação permite destruir a elasticidade natural dos resíduos. Sendo assim, sem essa destruição os briquetes não se tornam duráveis (BIOMAX, 2016). O briquete destaca-se pelas suas vantagens, isto é, fácil manuseio, logística, transporte e armazenamento, já que o resíduo adquire um formato sólido geométrico, ou seja, cilíndrico. Ademais, tem maior poder calorífico e gera menos cinzas, fumaça e fuligem (SILVEIRA, 2008). É de enfatizar que sua produção pode ser realizada com ou sem a presença de um agente aglutinante, que permite maior compactação e evita a ruptura do material (BITENCOURT et al., 2014). Para que isso aconteça também é crucial que o teor de umidade seja reduzido, que consequentemente proporciona o aumento de temperatura rapidamente. Estima-se o intervalo de 8 a 15% (DIAS et al., 2012), para melhor compactação e excelente propriedade de combustão, a fim de favorecer o alto poder calorífico.

Geralmente esse biocombustível sólido destina-se a churrascarias, fábricas de cerâmica, pizzarias, ou seja, os lugares que utilizam fornos e caldeiras (LOPES, 2014) em substituição a lenha e carvão vegetal, de modo a gerar emissões de dióxido de carbono reduzidas. Além do teor de umidade, composição química da biomassa, presença do agente aglutinante, temperatura e pressão usada durante o processo da compactação, outro fator relevante é o tamanho da partícula. Marafon (2019) esclarece que a granulometria ideal para briquetes está entre 5 mm e 10 mm. Ou seja, quanto menor é a partícula, menor é a porosidade e por conseguinte, maior é a densidade (PETRICOSKI, 2017). No entanto, partículas muito menores que 1 mm não são aplicáveis porque são menos densas, exceto a casca de arroz, que já possuem partículas de tamanhos menores. Segundo Quirino (2000), 1 m^3 de briquetes contém pelo menos 5 vezes mais energia que 1 m^3 de resíduo desta mesma biomassa. A produção de briquetes segue etapas, conforme a Figura 2:

Figura 2 - Fluxograma de produção de briquetes



Fonte: Autor (2026)

O Brasil produz mais de 1,2 milhões de toneladas de briquetes por ano, provenientes de madeiras, resíduos agrícolas, isto é, bagaço de cana-de-açúcar, casca de arroz, mandioca, café, resíduos de caroço de algodão, entre muitos outros (CEZAR, 2015). Desse modo, ocupa cada vez mais o espaço no mercado de energia renovável. Portanto, a briquetagem é uma alternativa promissora de alto potencial energético.

2.4 Matriz Energética do Nordeste

A Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2025) destaca que a oferta interna de energia no Brasil, no ano de 2024, foi composta em aproximadamente 50% por combustíveis fósseis, distribuídos entre petróleo e derivados (34,0%), gás natural (9,6%), carvão mineral (4,5%), urânio (1,3%) e outras fontes não renováveis (0,6%). A elevada participação dessas fontes na matriz energética contribui significativamente para a emissão de dióxido de carbono (CO_2), intensificando o efeito estufa e, consequentemente, o aquecimento global e as mudanças climáticas.

No entanto, as fontes renováveis, especialmente a energia proveniente das usinas hidrelétricas, ainda representam uma parcela significativa da matriz elétrica brasileira, correspondendo a cerca de 55,3% em 2024. Apesar disso, houve uma redução em relação ao

ano de 2023, quando a participação dessas fontes foi de 58,9%, em decorrência do aumento da participação das fontes eólica, solar e do gás natural na matriz energética nacional (EPE, 2025).

No Nordeste, especialmente no estado do Ceará, os elevados índices de radiação solar e a intensidade dos ventos favorecem a expansão das fontes eólica e solar, que vêm ocupando posições de destaque na matriz energética regional. Esse cenário influencia positivamente a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), uma vez que tais fontes emitem menores quantidades de dióxido de carbono quando comparadas aos combustíveis fósseis. Além disso, a participação da energia proveniente da biomassa também se mostra relevante, correspondendo a cerca de 8,1% da matriz energética em 2024 (EPE, 2025).

2.5 Avaliação do Ciclo de Vida (ACV)

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) permite realizar a análise minuciosa do produto ou serviço ao longo de todo o seu ciclo de vida, desde a extração da matéria-prima, até o destino final dos resíduos ou subprodutos (ABNT, 2009; GONZÁLEZ-GARCÍA, 2012), dependendo da natureza do estudo. No caso da biomassa, a análise inclui aspectos relacionados à poluição da mesma, bem como o manejo dos resíduos gerados, emissões de gases de efeito estufa e o consumo energético ao longo do processo (MAHMUD, 2021). ACV foi desenvolvido inicialmente nos Estados Unidos da América no final da decáda 1960 com as garrafas pet Coca-Cola e chegou ao Brasil em 1993 através de um subcomité Grupo de Apoio à Normalização Ambiental (GANA). A ISO 14040 que é uma das normas que regula e direciona as etapas de ACV foi publicada em 1997 por um dos coordenadores.

O limite do sistema de ACV a ser analisado pode ser: “do berço ao portão (*Cradle-to-Gate*)”; “do portão ao portão (*Gate-to-Gate*)”; “de berço ao túmulo (*Cradle-to-Grave*)”, “do portão ao túmulo (*Gate-to-Grave*)” ou (*Cradle-to-Cradle*) reciclagem entre outros (ISO 14044-14044, 2009). O Cradle-to-Gate corresponde a análise desde a extração da matéria-prima até a fabricação do produto, incluindo o transporte. O Gate-to-Gate incorpora apenas o que acontece dentro do processo analisado, corresponde ao uso ou aplicação. Por fim, o Cradle-to-Grave é mais completo e complexo, uma vez que engloba a análise de todo o ciclo desde a extração da matéria-prima, produção, transporte, uso e descarte final ou reciclagem. Além disso, essa ferramenta de gestão ambiental permite a tomada de decisões referente a produção e consumo sustentável (D’AMATO et al., 2020).

É necessário destacar durante a análise todas as entradas e saídas pertinentes do sistema, uso de energia, materiais utilizados e as emissões e resíduos (OLIVEIRA, 2012). Nesse sentido, ACV fornece uma abordagem quantitativa, indispensável para a seleção de melhores alternativas e entendimentos dos impactos ambientais do produto, tornando assim um diferencial para as empresas que o adotam (NHABANGA, 2023). Além disso, é necessário

frisar que para que a avaliação seja excelente é crucial que a escolhas dos dados bem como a idade deles sejam de forma criteriosa.

ACV segue quatro fases fundamentais nomeadamente, definição de objetivo e escopo, análise de inventário, avaliação de impactos e interpretação (ABNT NBR ISO 14040:2009). A definição de objetivo e escopo é uma das etapas essenciais para o primeiro momento da análise, que serve de guia para as etapas seguintes. Nessa perspectiva, necessita estar nítido os objetivos e ou as razões do estudo, o público-alvo (ALVES, 2014), bem como descrição e destaque do sistema de produto, unidade funcional, limite, fronteira do estudo, tipos ou categorias de impactos e modelo matemático utilizado. Define-se unidade funcional como unidade de referência que serve de base para quantificar e comparar produtos equivalentes, por exemplo, 1 Kg de briquetes. A fronteira por sua vez permite selecionar quais processos elementares se alinham com os objetivos e critérios do estudo que devem ser incluídos na ACV. O limite do sistema é condicionado principalmente pela disponibilidade de dados, recursos, período da avaliação e localização (AGRAWAL et al., 2014).

A análise do inventário permite realizar a coleta de dados que podem ser qualitativos e ou quantitativos. De modo geral, é a etapa mais demorada e trabalhosa. Desse modo, foca-se na seleção dos dados primários e secundários, ou seja, os dados de entrada e saída conhecidos como inputs/outputs. Os dados primários são coletados diretamente do local da produção, ao passo que, os dados secundários são encontrados na base de dados, fontes publicadas, sites governamentais, entre outros. Viana (2008) explana que o uso de dados primários proporciona maior credibilidade ao estudo de ACV, isto porque, diminui a dependência de suposições e dados estrangeiros. Assim, ressalta-se a necessidade da qualidade das informações de forma coerente, de modo a não comprometer os resultados.

Esses dados referem-se às matérias-primas em quantidades de unidade funcional, uso de energia, água, resíduos, emissões para o ar entre outros. Além disso, é indispensável frisar que esses dados são condicionados pelos limites ou fronteiras do sistema. Outro ponto a se destacar é que, nessa fase identifica-se os possíveis fluxos energéticos, ou seja, os combustíveis e as demais fontes energéticas utilizadas no processo. A análise de inventário é vista como balanço energético ou de massa, que permite quantificar as entradas e saídas do sistema de produto.

Na Avaliação dos impactos destina-se à identificação e análise do desempenho do produto e a aplicação de melhorias (ALVES, 2014), representados por meio de categorias do impacto, como por exemplo, mudanças climáticas e depleção da camada de ozônio, acidificação e uso da água, eutrofização, efeitos respiratórios e ecotoxicidade, potencial de aquecimento global entre outros.

Evidencia-se duas categorias dentro da Avaliação do impacto, isto é, midpoint e endpoint. A diferença dos dois encontra-se nos resultados, em outras palavras, o midpoint é o mais comum pelo fato de proporcionar resultados mais precisos e fiéis em comparação a endpoint que apresenta incertezas (OLIVEIRA, 2017). Portanto, a seleção deve ser levada em conta o objetivo e escopo de ACV. Mudanças climáticas, redução da camada de ozônio, acidificação, toxicidade humana, uso da terra e esgotamento de recursos fazem parte de midpoint, ao passo que que a saúde humana, meio ambiente e recursos naturais estão incluídos na categoria de endpoint.

Já na Interpretação que é a fase final, consiste na interpretação de tudo o que foi feito anteriormente, desde a qualidade dos dados, período, área geográfica, tecnologia, e requere atenção. É a fase conveniente para conclusão, recomendação e identificação dos impactos do produto. Geralmente elabora-se um relatório final, análise crítica e pode-se adotar melhoria, implementação de estratégias e reformulação caso for necessário (FERRÃO, 2009).

Existem inúmeros *softwares* que debruçam sobre ACV, repartindo em *softwares* pagos ou livres. Destaca-se o SimaPro, OpenLCA, Gabi, Greet, Umberto, entre muitos outros. Além de bases de dados como Ecoinvet, KCL, Ecodata, NREL LCI database, SICV Brasil e outras que do mesmo modo podem ser gratuitas ou não. Assim, a Avaliação do Ciclo de Vida torna-se uma metodologia qualitativa e quantitativa pertinente que permite ter uma visão geral do sistema referente ao produto a ser analisado, proporcionando planejamento estratégico e organizado e otimizando o sistema, além do marketing e o desenvolvimento de novos produtos (MOURAD, 2002). Essa ferramenta poderosa também serve de inovação benéfica para os fabricantes, fornecedores, clientes e até mesmo políticos. (JESWAWI et al., 2014).

2.6. Software OpenLca

OpenLca é open source, ou seja, um *software* livre que permite realizar a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) que é o mais comum. Também avalia o Custo do Ciclo de Vida (CCV), Ciclo de Vida Social (ACVS), pegada de carbono e de água. Desenvolvida em 2006 por GreenDelta, é uma ferramenta que realiza cálculos de forma rápida e está em constante aprimoramento, pois sua versão mais atual foi melhorada em fevereiro de 2026, correspondente à 2.6.1.

Uma das caraterísticas que diferenciam OpenLca de Gabi e Umberto é a possibilidade de criar a própria base de dados do zero, embora seja mais trabalhoso, e ainda que tenha base de dados disponíveis de diversos países, algumas exigem licenças que deveras são caras e nem

sempre são representativas fielmente. Outro ponto a se destacar é a possibilidade da importação de bases de dados dentro de uma outra já existente (NHABANGA, 2023). Pelo fato de ser um programa gratuito também é viável compartilhar base de dados entre os utilizadores e resolver problemas em conjunto, bem como realizar ajustes através de uma comunidade online.

No site openlca nexus contém banco de dados, dentre eles os mais conhecidos e utilizados majoritariamente: o Bioenergiedat e Ecoinvent. Ecoinvent é um banco de dados internacional que possui a maior base de dados do mundo, sistematizado de forma consistente e transparente, no entanto, requere licença (ROSADO, 2015). Dependendo do objetivo e metodologia do estudo existem outros que se enquadram respectivamente ao contexto.

2.7 SICV Brasil

O Banco Nacional de Inventário do Ciclo de Vida (SICV Brasil) disponibiliza dados de inventários de produtos e processos, incluindo fluxos de materiais, consumo de energia e recursos naturais, emissões, transporte, produtos agrícolas, resíduos sólidos e urbanos e processos produtivos específicos do contexto brasileiro. A necessidade da sua criação deve-se ao fato de as empresas brasileiras necessitarem de aplicar ACV por meio de base de dados gratuitas adaptadas à realidade. Pois, a escassez de informação, a incerteza dos dados de inventários, bem como a qualidade deles foram fatores determinantes que impulsionou a iniciativa do seu desenvolvimento. Nesse sentido, o Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia (IBICT) lançou-o em 2016. Esse banco de dados nacional contém conjunto de dados qualitativos e quantitativos dos mais diversos produtos, serviços e processos (SILVA et al., 2017). Nessa óptica, urge também a necessidade de elaboração de um guia para nortear os data providers, isto é, os fornecedores e doadores de dados para a validação preliminar.

Como a maioria dos bancos de dados são de países da Europa e América do Norte, o IBICT incrementou SICV Brasil com mais robustez e confiabilidade. Willers et al. (2013) elucida que os estudos de ACV no Brasil concentram-se principalmente nas regiões Sudeste e Sul do país, destacando a Universidade de São Paulo (USP) e Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).

2.8 Potencial de Aquecimento Global

Potencial de Aquecimento Global é um dos indicadores de análise do ciclo de vida, mais comum e usado, visto que, fornece informações de dióxido de carbono, metano e outros

poluentes. A unidade de medida é expressa em quilogramas de co_2 equivalentes (MANNHEIM, 2021).

3 METODOLOGIA

3.1 Coleta das amostras

As amostras de cascas de coco foram obtidas no supermercado de Redenção-Ce, pertencente ao Maciço de Baturité, e utilizou-se a parte mesocarpo fibroso. Por conseguinte, os experimentos foram encaminhados e realizados no Laboratório de Análises Químicas, localizado no campus de Auroras, pertencente ao Instituto de Engenharia e Desenvolvimento Sustentável-IEDS.

3.2 Secagem

Para que a biomassa estivesse em condições favoráveis, foi necessário fazer um pré-tratamento, isto é, secagem. Pois, Bitencourt et al. (2014) esclarece que a casca de coco verde tem aproximadamente 85% de umidade. Assim, inicialmente fez-se a secagem das amostras no sol ao ar livre durante duas semanas, a fim de reduzir a umidade e evitar fungos. Bhattacharya, Sett e Shrestha (1989) defendem que o excesso de umidade pode ocasionar explosões devido à formação de vapor. Sendo assim, optou-se pela secagem solar, visto que é uma alternativa sustentável, pois, Cesa et al. (2009) esclarece que os custos de energia elétrica usada durante todo o processo de produção de briquetes é elevado. Assim, tornou-se necessário a secagem natural, além da secagem na estufa.

3.3 Trituração da biomassa

Os resíduos foram cortados com a tesoura de poda e triturados com o liquidificador industrial de modelo LS10, com o intuito de reduzir os tamanhos granulométricos e facilitar a etapa posterior para briquetagem. Além disso, o liquidificador foi conectado a um analisador de energia RE800, de modo a possibilitar o registro de potência e energia elétrica consumida em KWh. Ademais, foi necessário monitorizar o tempo de operação durante o processo. Esses dados serviram de parâmetros de entrada no inventário do ciclo de vida para a modelagem e análise ambiental no software OpenLCA.

3.4 Determinação da análise imediata da biomassa:

As análises físico-químicas foram realizadas antes e após a briquetagem de acordo com suas respectivas normas, com adaptações. A análise imediata corresponde ao conjunto de algumas análises específicas, listadas a seguir.

3.4.1 Teor de Umidade e Sólidos totais (NBR 16550)

Para a determinação do teor de umidade e do teor de sólidos totais, a metodologia é a mesma, o que diferencia as duas são as equações utilizadas no cálculo. Esta análise se baseou nas instruções da NBR 16550. No início da análise foi preciso colocar um cadinho de porcelana sem tampa na estufa a 105± 3 °C durante 1 hora. Passado o tempo, retirou-se o cadinho da estufa e inseriu em um dessecador pelo tempo necessário para atingir a temperatura ambiente, que ocorreu em cerca de 30 min. Após a temperatura baixar, pesou-se o cadinho em balança analítica e anotou a sua massa. Este procedimento se repetiu até que a massa se manteve constante. Seguindo, foi preciso pesar aproximadamente 1,0 g da amostra no cadinho, em balança analítica, e anotar a massa exata da amostra úmida. Em seguida o cadinho com a amostra foi colocado na estufa a 105 ± 3 °C durante 2 horas. Após este período foi preciso retirar o cadinho contendo a amostra da estufa e inserir no dessecador pelo tempo necessário até atingir a temperatura ambiente, em cerca de 30 min. O cadinho com a amostra foi pesado e sua massa anotada. A massa do cadinho seco foi descontada para se obter a massa da amostra seca. Este procedimento se repetiu até que a massa se manteve constante.

As Equações 1 e 2 representam respectivamente o teor de umidade e sólidos totais:

$$TU\ (\%) = \left(\frac{Mau - Mas}{Mau}\right) \times 100 \qquad (1)$$

$$TS\ (\%) = \left(\frac{Mas}{Mau}\right) \times 100 \qquad (2)$$

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 16550

Onde TU é o Teor de Umidade da amostra e TS é o Teor de Sólidos totais da amostra, ambos expressos em porcentagem; Mau é a massa da amostra úmida, expressa em gramas (g) e Mas é a massa da amostra seca também expressa em gramas (g).

3.4.2 Teor de Materiais Voláteis (ASTM D3175)

Para a realização da análise do teor de materiais voláteis foi utilizada a norma ASTM D3175. Primeiramente, 2 cadinhos de porcelana e com tampa, foram pesados e suas massas registradas. Após a pesagem, foi adicionado aos cadinhos, 1 g de amostra seca, e suas massas também foram registradas. Após esse processo, os cadinhos foram levados até o interior da

mufla, onde permaneceram por 7 minutos na temperatura de 950ºC. Posteriormente, os cadinhos foram resfriados durante 1 hora em um dessecador em temperatura ambiente. As massas finais dos cadinhos foram verificadas e anotadas, após o resfriamento. A Equação 3 representa o teor de materiais voláteis:

$$TMV\ (\%) = \left(\frac{M_i - M_f}{M_a}\right) \times 100 \qquad (3)$$

Fonte: Adaptado de ASTM D3175

Onde TMV: teor percentual de materiais voláteis; M_a: massa da amostra (g); M_f: massa final do cadinho (voláteis) em gramas e M_i: massa inicial do cadinho com a amostra (g).

3.4.3 Teor de Cinzas e, por diferença, o Teor de Carbono Fixo (NBR 16550)

A análise do teor de cinzas seguiu a mesma norma das análises anteriores, ABNT NBR 16550. Assim, foi preciso colocar o cadinho com tampa, semiaberto, em mufla, à temperatura de 575 ± 25 °C, pelo período de 4 horas. Em seguida o cadinho foi retirado da mufla cuidadosamente e inserido em um dessecador pelo tempo necessário para atingir a temperatura ambiente, aproximadamente 1 hora. O cadinho depois de resfriado, foi pesado em balança analítica e sua massa foi anotada. Seguindo, foi pesado 1 g da amostra, em base seca, no cadinho, e sua massa exata foi anotada. O cadinho com a amostra foi levado para a mufla à temperatura de 575 ± 25 °C durante o período de 4 horas. Nesta etapa o cadinho foi deixado com a tampa semiaberta para permitir a entrada de oxigênio. Passado o tempo necessário, o cadinho foi removido da mufla, cuidadosamente, e inserido em um dessecador pelo tempo necessário para atingir a temperatura ambiente, aproximadamente 1 hora. Com o cadinho em temperatura própria para manuseio o experimento continuou, para isso foi preciso tampar o cadinho, pesá-lo em balança analítica e anotar a massa exata.

A Equação 4 diz respeito ao teor de cinzas:

$$TCt(\%) = \left(\frac{MCt}{Mas}\right) \times 100 = \left(\frac{MCt \times 100}{Mau \times TS}\right) \times 100 \qquad (4)$$

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 16550

Onde TCt é o teor de cinzas totais, expresso em porcentagem; MCt é a massa de cinzas totais, expressa em gramas (g) e Mas é a massa da amostra, em base seca, empregada na determinação de cinzas totais e expressa em gramas (g); Mau é a massa da amostra, em base úmida, empregada na determinação de cinzas totais, expressa em gramas (g); TS é o teor de sólidos totais da amostra, expresso em porcentagem massa por massa.

O teor de carbono fixo resultou na diferença entre a massa total da amostra e os teores de cinzas e materiais voláteis.

A Equação 5 evidencia o teor de carbono fixo:

$$TCf = 100 - TCt - TMV \qquad (5)$$

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 8112

Onde TCf é o teor de carbono fixo (%), TCf o teor de cinzas (%) e TMV o teor de materiais voláteis (%).

3.4.4 Determinação do poder calorífico superior da biomassa

O poder calorífico expresso em MJ/Kg é determinado com base nos resultados experimentais de análise imediata (PARIKH et al., 2005), ou seja, pela Equação 6:

$$PCs = 0{,}3536 \times (\%\, TCf) + 0{,}1559 \times (\%\, TMV) - 0{,}0078 \times (\%\, TCt) \qquad (6)$$

Fonte: Parikh, Channiwala e Ghosal (2005)

Onde, PCs é poder calorífico superior, base seca, (MJ/kg). TCt é o teor de carbono fixo na amostra (%).TMV é o teor de materiais voláteis da amostra (%).TCf é o teor de cinzas totais da amostra.

3.5 Produção do briquete

A prensagem da biomassa foi realizada em uma prensa hidráulica à frio da marca Marconi, modelo MPH 15, fabricado em aço, com cilindro de pressão máxima de 15 toneladas. A pressão empregada na produção dos briquetes foi em torno de 7,0 toneladas. É importante destacar que o briquete foi mantido à pressão constante por 5 minutos durante o processo de prensagem, com o objetivo de promover a agregação das fibras formadas pelos resíduos. A Figura 3 ilustra a prensa hidráulica:

Figura 3 - Prensa Hidráulica



Fonte: Autor (2026)

3.6 Medição do consumo energético dos equipamentos

Durante as etapas experimentais foram utilizados instrumentos específicos de medição de consumo energético. Para o liquidificador industrial e estufa, utilizou-se o analisador de energia, modelo RE8000, conectado diretamente durante toda a operação e anotado a potência

elétrica e a energia consumida ao longo do tempo funcional. Já no caso da mufla, utilizou-se o medidor de energia ac, modelo PZEM-061. Todavia, na etapa de briquetagem, pelo fato da prensa hidráulica manual não possuir acionamento elétrico, isto é, não estando conectado à rede elétrica durante a operação, significou que não houve o consumo direto de energia elétrica nessa etapa. Esses valores do consumo energético registrados, foram indispensáveis para os dados de entrada do inventário do ciclo de vida, conforme a Tabela 2:

Tabela 2- Consumo energético dos equipamentos

Equipamentos	Potência (W)	Tempo de uso (h)	Consumo (KWh)
Liquidificador Industrial	293,77	0,1667	0,038
Estufa	561,77	6	3,37062
Mufla		10	4,051

Fonte: Autor (2026)

Figura 4 - Instrumentos de medição de consumo energético
(a) Modelo RE8000 (b) Modelo PZEM-061



Fonte: Autor (2026)

3.7 Modelagem da Avaliação do Ciclo de Vida no OpenLca

3.7.1 Definição do objetivo e escopo do estudo

A avaliação do ciclo de vida de produção de briquetes de casca de coco no Maciço de Baturité, localizada no Ceará, seguiu as 4 fases recomendadas pela ISO 14040 e ISO 14044. Desse modo, utilizou o software OpenLCA, versão 2.6.0 e o Banco de dados SICV Brasil por ser gratuito. No entanto, constatou-se a indisponibilidade de dados regionalizados de eletricidade de baixa tensão para o estado do Ceará. Assim, foi necessário a criação de um processo específico que representasse fielmente a eletricidade da região. Esse processo foi adaptado e construído de acordo com os dados do Balanço Energético Nacional (BEN), Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) Empresa de Pesquisa Energética (EPE), Operador Nacional de Sistema Elétrico (ONS). Além disso, os fatores de emissão de Co_2 também foram

inseridos. Nesse sentido, a falta de banco de dados regionais apresentou-se como uma limitação do estudo de ACV.

A unidade funcional considerada foi de 1 Kg de briquetes de casca de coco. Adotou-se uma abordagem do tipo " do portão ao portão" (Gate-to-Gate), visto que, as etapas do processo de produção de briquetes foram realizadas na escala laboratorial, isto é, trituração da biomassa, secagem, briquetagem, e o consumo energético dos respetivos equipamentos utilizados. Desconsiderou-se o transporte, devido à baixa representatividade, visto que se tratava de coleta local e em pequena escala.

O método ReCiPe Midpoint 2016 (H) foi escolhido pelo fato de ser um método específico para a pegada ambiental de briquetes ou pellets. Assim, esse método debruça-se em seguintes categorias, nomeadamente, Depleção Abiótica, Potencial de Acidificação, Potencial de Eutrofização, Potencial de Aquecimento Global, Depleção da Camada de Ozônio e Potencial de Criação de Ozônio Fotoquímico. Focou-se no Potencial de Aquecimento Global, uma vez que é mais comum para estudos no ACV aplicados aos setores energéticos (SILVA et al., 2022). Ademais, este evidencia o Co_2 que contribui para o aquecimento global.

3.7.2 Inventário do ciclo de Vida

Na construção de inventários foram utilizados dados primários e secundários. Isto é, os primários consistem nos fluxos de entrada e saída, obtidos a partir das análises físico-químicas, ou seja, a análise imediata realizada no laboratório, convertida para a unidade funcional, massa em Kg e energia consumida em MJ ou KWh. E os secundários foram provenientes de literatura científica e do banco de dados. É de salientar que durante todo o processo, a queima do briquete não foi incluída no estudo, uma vez que, focou-se apenas no impacto do próprio produto.

Quanto à modelagem da Matriz Elétrica Regional do Ceará foi realizada também a análise de inventário do ciclo de vida (ICV) para representar a matriz elétrica de baixa tensão. Os dados foram coletados da geração setorial (ONS) e as quantificações das emissões dos gases efeito de estufa (GEE) para cada fonte energética da matriz utilizou as médias de ciclo de vida, isto é, os fatores de emissão IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). O seu uso permitiu a conversão da geração de energia (KWh) de cada fonte em equivalente de dióxido de carbono ($CO_2\ eq$).

Tabela 3- Dados para construção de inventário do Mix regional

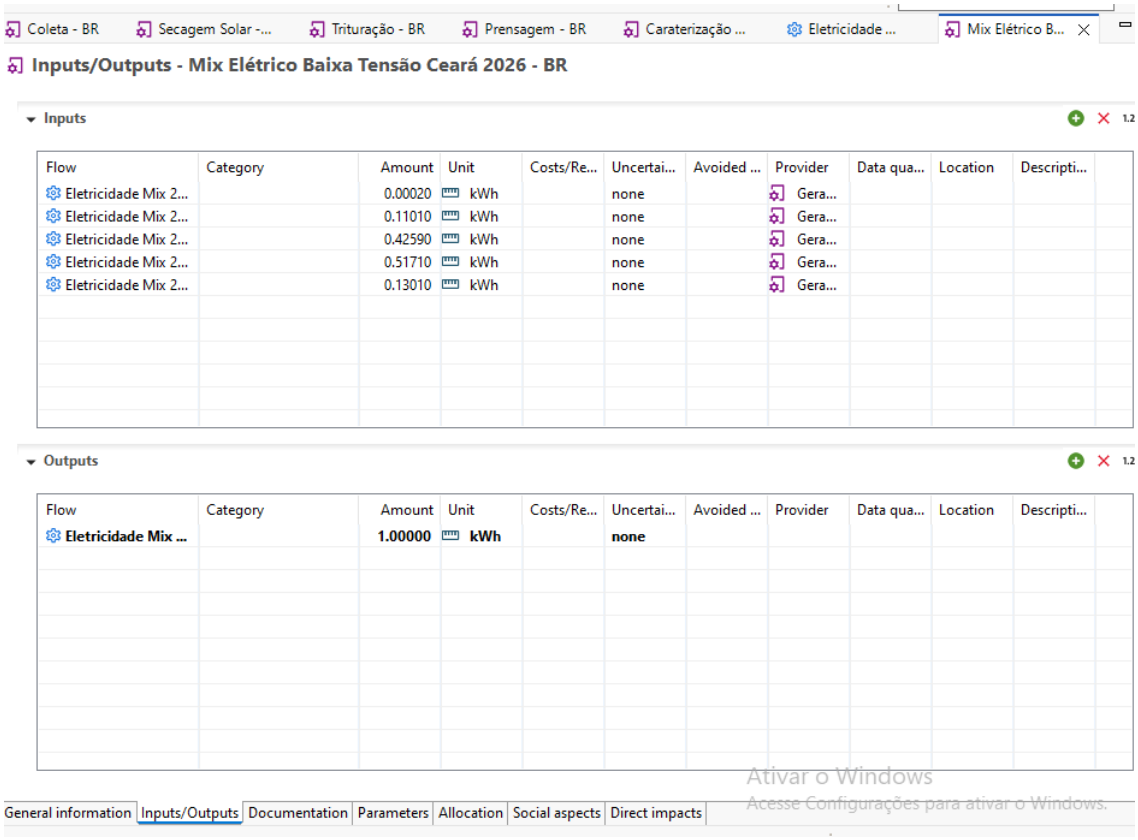
Fonte Energética	Geração (GWh)	Participação	Co_2/Kwh	Valor para openLca (Amount KWh)
Eólica	5806	43,70%	0,011	0,5171
Solar	4781	35,99%	0,048	0,4259

Carvão	1460	10,99%	0,820	0,1301
Gás	3	0,02%	0,490	0,0002
Resíduos industriais/Biomassa	1236	9,30%	0,230	0,1101

Fonte: IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change 2025). Operador Nacional de Sistema Elétrico (ONS 2025)

A última coluna foi obtida pela multiplicação do percentual de cada fonte pelo fator de correção das perdas. Considerou-se a perda total de 15,5% para o estado do Ceará.

Figura 5 - Mix Elétrico de Baixa Tensão de Ceará



Fonte: Autoria própria (2026)

A Tabela 4 representa as entradas e saídas de cada processo para a produção de briquetes:

Tabela 4- Inputs/ outputs de Processo 1 Coleta

Processo 1: Coleta da Biomassa	Fluxo (Nomenclatura no OpenLCA)	Quantidade	Unidade
Input	Casca de coco (recurso natural)	1,021	Kg
Output	Casca de coco in natura	1,021	Kg

Fonte: Autoria própria (2026)

Tabela 5-Inputs/ Outputs de produção de Briquetes de casca de coco

Processo 2: Secagem solar	Fluxo (Nomenclatura no openLca)	Quantidade	Unidade
Input	Casca de coco in Natura	1,021	Kg
Output	Casca de coco pré-seca	1,010	Kg
Output	Water vapour	0,011	Kg
Processo 3: Trituração			
Input	Casca de coco pré-seca	1,010	Kg
Input	Electricity (low voltage)	0,038	KWh
Output	Casca de coco Triturada	1,000	Kg
Output	Municipal solid waste	0,010	Kg
Processo 4: Caracterização Laboratorial (análise imediata)			
Input	Casca de coco Triturada	0,0030275	Kg
Input	Electricity (low voltage)	7,42162	KWh
Output	Serviço de Caracterização	1,000	Kg
Output	Municipal solid waste	0,0011245	Kg
Output	Water vapour	0,0000915	Kg
Output	Carbon dioxide, Biogenic	0,0018115	Kg
Processo 5: Prensagem (Briquetagem			
Input	Casca de coco Triturada	1,000	Kg

Input	Serviço de caracterização	1,000	Kg
Output	Briquete de casca de Coco	1,000	Kg

Fonte: Autoria própria (2026)

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Análise imediata

Os resultados das análises imediatas foram obtidos por meio das determinações dos teores de umidade, materiais voláteis, cinzas, carbono fixo e poder calorífico superior. Os resultados estão apresentados pela média e desvio padrão conforme a Tabela 6. Também foi adicionado a esta tabela a analise imediata de outras biomassas realizado por outros pesquisadores, com o objetivo de obter valores de referência para efeito de comparação com as características da analise deste trabalho.

Tabela 6- Caracterização físico-químico de briquete de casca de coco

Biomassa	Umidade (%)	Voláteis (%)	Cinzas (%)	Carbono fixo (%)	Poder calorífico (Mj/Kg)	Referência
Briquete (100% casca de coco)	9,10 ± 0,20	75,09 ± 1,14	5,50 ± 0,09	19,41	18,53	(Autor, 2026)
Bagaço de cana-de-açúcar	12,33 ± 2,52	2,17 ± 0,26	0,96 ± 0,02	84,54 ± 0,26	_	(SANTOS, et al., 2026)
Casca de arroz	10,12 ± 0,04	66,61 ± 0,59	12,03 ± 0,09	11,24 ± 0,58	14,25	(MACHADO, et al., 2022)
Caroço de pequi	6,48	79,04	1,52	19,42	_	(FERREIRA, et al., 2025)
Casca de babaçu	3,44	94,46	1,13	0,97	_	(FERREIRA, et al., 2025)

Fonte: Autor (2026)

Figura 6 - Briquetes de casca de coco



Fonte: Autor (2026)

4.1.1 Teor de Umidade e Sólidos totais (NBR 16550)

A umidade é uma caraterística fundamental na qualidade do briquete, isto é, facilita no processo de compactação (TAQUIDIR, 2024). Nesse sentido, o teor de umidade do briquete 100% casca de coco foi de $9{,}10 \pm 0{,}20\%$. Este valor esteve dentro do padrão da literatura, visto que, para Nakashima et al. (2014), o intervalo recomendado está entre 8 a 12%. Um ponto a se destacar é que o briquete produzido não apresentou rachaduras, confirmando assim o resultado positivo. Autores como Bezerra et al. (2017) e Frigueira (2011) encontraram valores próximos, isto é, 10,89% e 9,19% respectivamente.

É importante frisar também que, quanto maior é a umidade, menor é o poder calorífico, ou seja, o poder de combustão devido ao processo de evaporação que absorve (PAZ et al., 2018). Além de reduzir a resistência mecânica e a durabilidade do briquete. Enquanto que o teor de sólidos totais encontrado foi de $90{,}90 \pm 0{,}20\%$.

4.1.2 Teor de Materiais Voláteis (ASTM D3175)

O teor de materiais voláteis resultou em $75{,}09 \pm 1{,}14\%$, na mesma faixa de (BEZERRA et al., 2017) que obteve 77, 84% . De acordo com Vieira (2012), as biomassas com alto teor de materiais voláteis queimam facilmente, o que se verificou durante os experimentos. Por outro lado, baixo teor de materiais voláteis significa mais fumaça e gases tóxicos, ocasionados pela combustão lenta (Chaves et al., 2013; Nakashima et al., 2014).

4.1.3 Teor de Cinzas e, por diferença, o Teor de Carbono Fixo (NBR 16550)

O teor de cinzas foi de $5{,}50 \pm 0{,}09\%$, adequado para a utilização como fonte energética. Para Vieira et al. (2013) os valores elevados de teor de cinza comprometem a eficiência e o poder calorífico. Em outras palavras, o baixo poder calorífico torna o briquete com pouca qualidade e consequentemente pode provocar corrosão dos equipamentos (PAZ et al., 2018). Além de causar perdas energéticas e prejudicar a transferência de calor (KLAUTAU, 2008). Um ponto crucial que se deve ter em conta, é que esse valor $5{,}50 \pm 0{,}09\%$, pode ser

influenciado pela contaminação durante o processo de coleta, isto porque pode ter vestígios de solo (RENDEIRO et al., 2008).

Já que alguns autores como Alakangas (2005) recomendam teor de cinzas abaixo de 4%. Como é o caso Bezerra et al. (2017) que foi de 3,2%. No entanto, os resíduos agrícolas têm índices mais elevados, devido à presença de substâncias inorgânicas (VALE et al., 2012). Ferreira et al. (2016) alcançou 5,03 de teor de cinzas de casca de coco. O teor de cinzas tem uma relação inversa com poder calorífico superior (PCS), visto que quanto maior é o teor de cinzas, menor é o poder calorífico superior.

Pela equação (6) o carbono fixo resulta na retirada da umidade, cinzas e voláteis. Desse modo, o teor de carbono fixo obtido foi de 19,41%. Vale et al. (2012) constatou elevado teor de carbono fixo de casca de coco de 23, 72%. Quanto maior o carbono fixo, maior é o calor gerado. O resultado do teor de carbono fixo também é influenciado pelo tipo e espécie de árvore utilizada (TAQUIDIR, 2024). É perceptível que o carbono fixo está intrinsecamente relacionado ao poder calorífico. Ademais, o carbono fixo depende dos materiais voláteis.

Assim, com base nos resultados e comparação de literaturas, os combustíveis com elevado teor de carbono fixo queimam mais lentamente (VALE e GENTIL, 2008). Assim, essa caraterística evidenciada no briquete é imprescindível nos resíduos lignocelulósicos, como é o caso da casca de coco.

4.1.4 Determinação do poder calorífico superior da biomassa

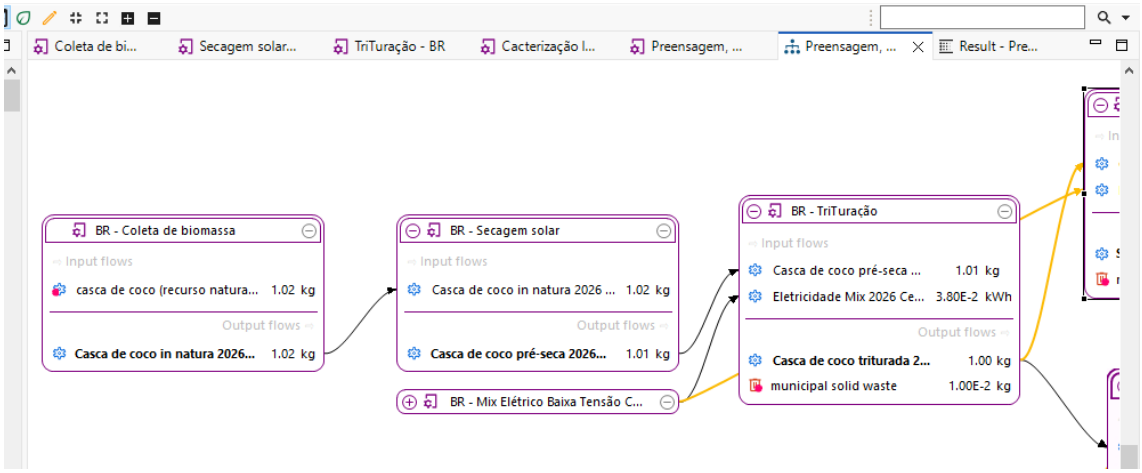
O valor do poder calorífico superior foi de 18,53 MJ/Kg, equivalente a 4428,77 $Kcal/Kg$ que representou um parâmetro para a eficiência energética e foi promissor. Pois, a maioria dos briquetes produzidos a partir dos resíduos agrícolas no Brasil, correspondem a faixa de 18 MJ/Kg a 21 MJ/Kg do poder calorífico superior (BIOMACHINE, 2007) o que comprovou na prática.

4.2 Avaliação do Ciclo de vida

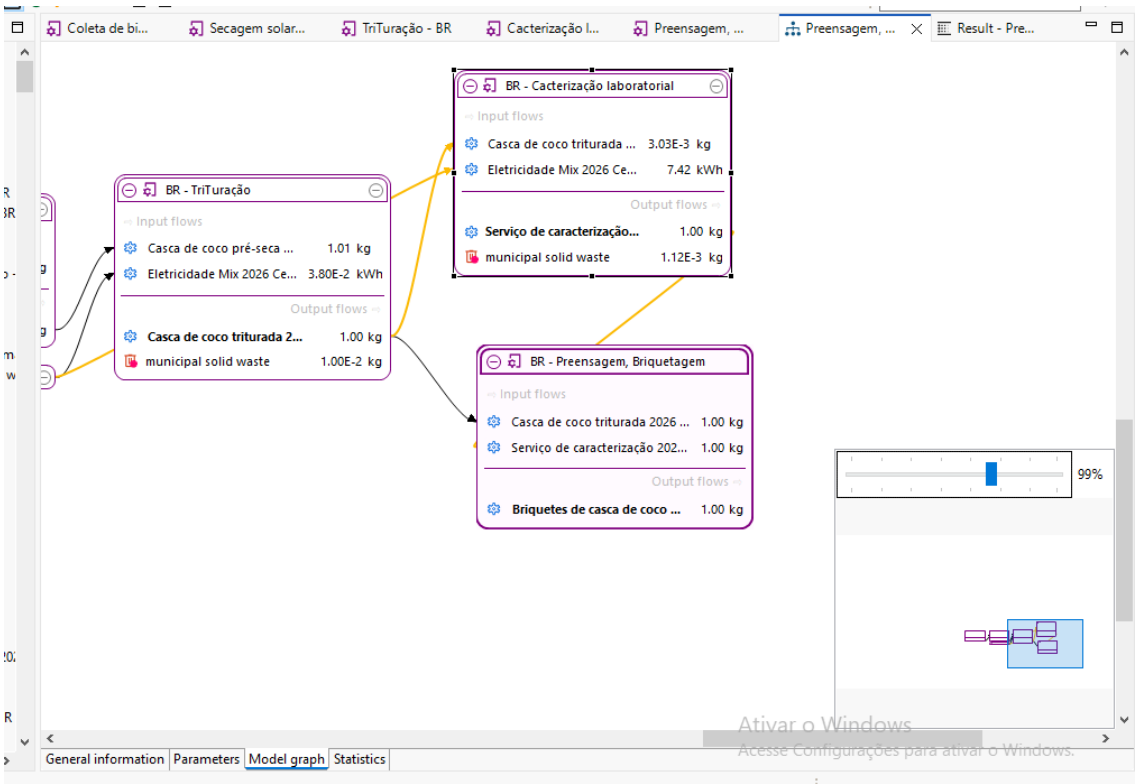
4.2.1 Avaliação do Impacto

Na aba Model graph permite visualizar todo o processo para a avaliação do ciclo de vida de produção de briquetes de casca de coco, desde a coleta da biomassa até a prensagem.

Figura 7 - Fluxograma de ACV



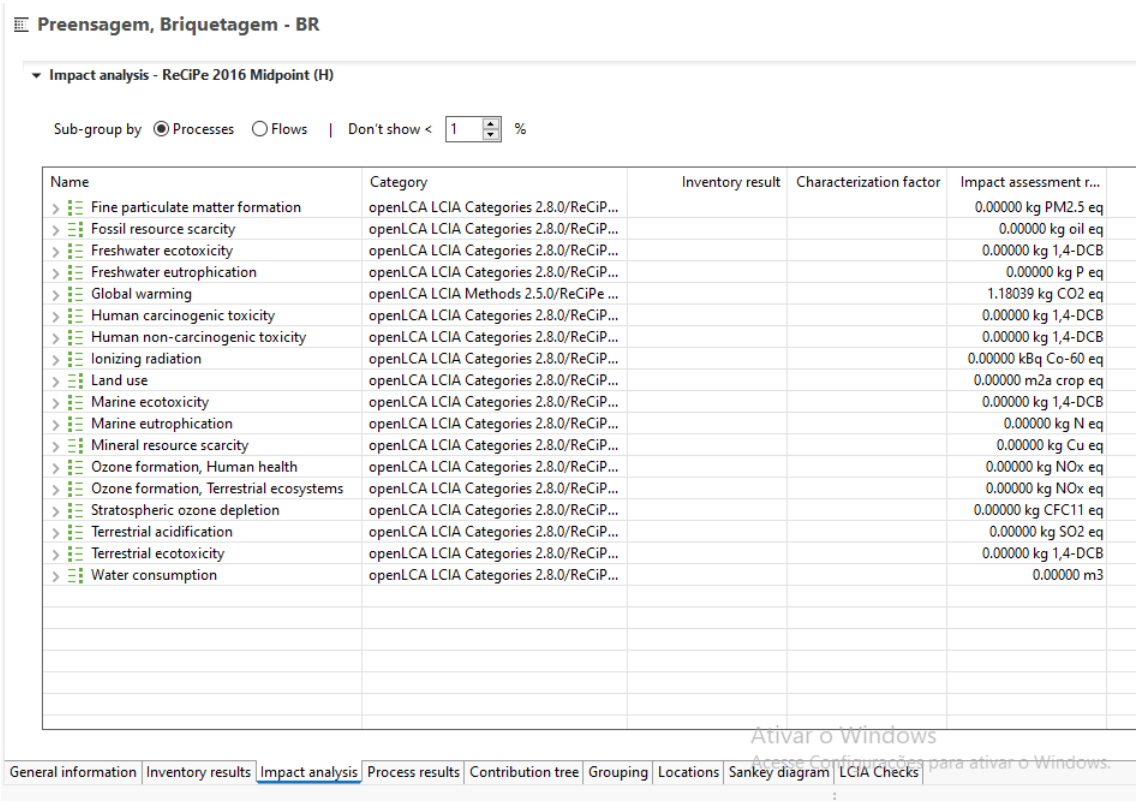
Continuação



Fonte: OpenLca (2026)

Como o foco principal centralizou no impacto do Aquecimento Global (Co_2), o resultado foi obtido após a regionalização, que pode ser observado pela Figura 8 e 9.

Figura 8 - Resultado de ACV pelo método ReCiPe Midpoint 2016 (H) para 1kg de briquete de casca de coco



Preensagem, Briquetagem - BR

Impact analysis - ReCiPe 2016 Midpoint (H)

Sub-group by ◉ Processes ○ Flows | Don't show < 1 %

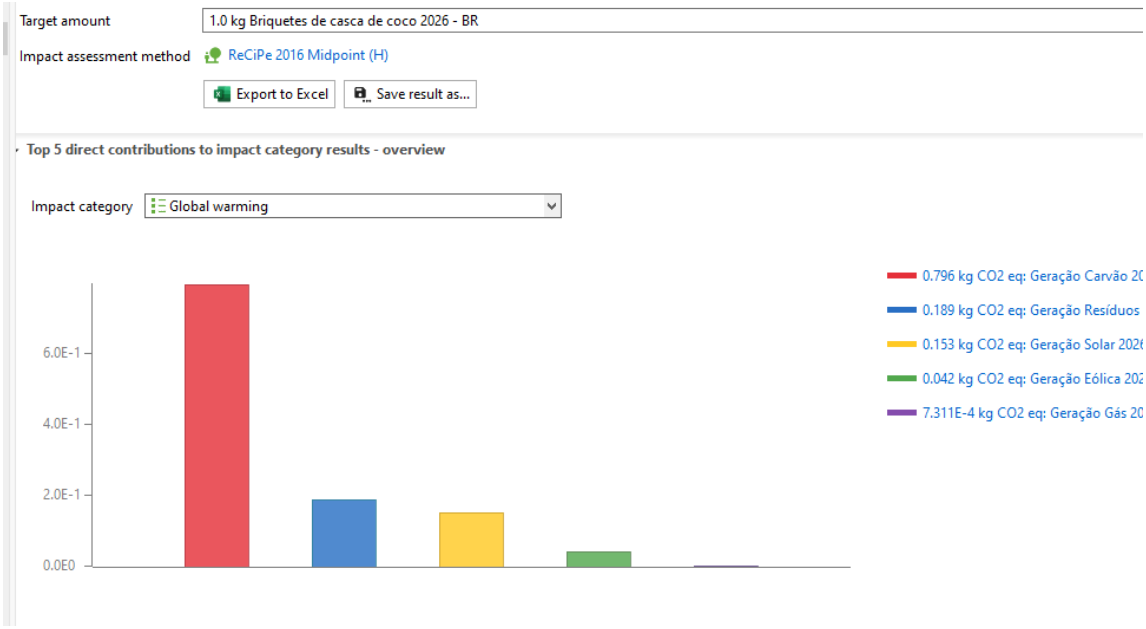
Name	Category	Inventory result	Characterization factor	Impact assessment r...
Fine particulate matter formation	openLCA LCIA Categories 2.8.0/ReCiP...			0.00000 kg PM2.5 eq
Fossil resource scarcity	openLCA LCIA Categories 2.8.0/ReCiP...			0.00000 kg oil eq
Freshwater ecotoxicity	openLCA LCIA Categories 2.8.0/ReCiP...			0.00000 kg 1,4-DCB
Freshwater eutrophication	openLCA LCIA Categories 2.8.0/ReCiP...			0.00000 kg P eq
Global warming	openLCA LCIA Methods 2.5.0/ReCiPe ...			1.18039 kg CO2 eq
Human carcinogenic toxicity	openLCA LCIA Categories 2.8.0/ReCiP...			0.00000 kg 1,4-DCB
Human non-carcinogenic toxicity	openLCA LCIA Categories 2.8.0/ReCiP...			0.00000 kg 1,4-DCB
Ionizing radiation	openLCA LCIA Categories 2.8.0/ReCiP...			0.00000 kBq Co-60 eq
Land use	openLCA LCIA Categories 2.8.0/ReCiP...			0.00000 m2a crop eq
Marine ecotoxicity	openLCA LCIA Categories 2.8.0/ReCiP...			0.00000 kg 1,4-DCB
Marine eutrophication	openLCA LCIA Categories 2.8.0/ReCiP...			0.00000 kg N eq
Mineral resource scarcity	openLCA LCIA Categories 2.8.0/ReCiP...			0.00000 kg Cu eq
Ozone formation, Human health	openLCA LCIA Categories 2.8.0/ReCiP...			0.00000 kg NOx eq
Ozone formation, Terrestrial ecosystems	openLCA LCIA Categories 2.8.0/ReCiP...			0.00000 kg NOx eq
Stratospheric ozone depletion	openLCA LCIA Categories 2.8.0/ReCiP...			0.00000 kg CFC11 eq
Terrestrial acidification	openLCA LCIA Categories 2.8.0/ReCiP...			0.00000 kg SO2 eq
Terrestrial ecotoxicity	openLCA LCIA Categories 2.8.0/ReCiP...			0.00000 kg 1,4-DCB
Water consumption	openLCA LCIA Categories 2.8.0/ReCiP...			0.00000 m3

Ativar o Windows
Acesse Configurações para ativar o Windows.

General information | Inventory results | Impact analysis | Process results | Contribution tree | Grouping | Locations | Sankey diagram | LCIA Checks

Fonte: OpenLca (2026)

Figura 9 -Contribuição das fontes energéticas para as emissões Co_2



Fonte: OpenLca (2026)

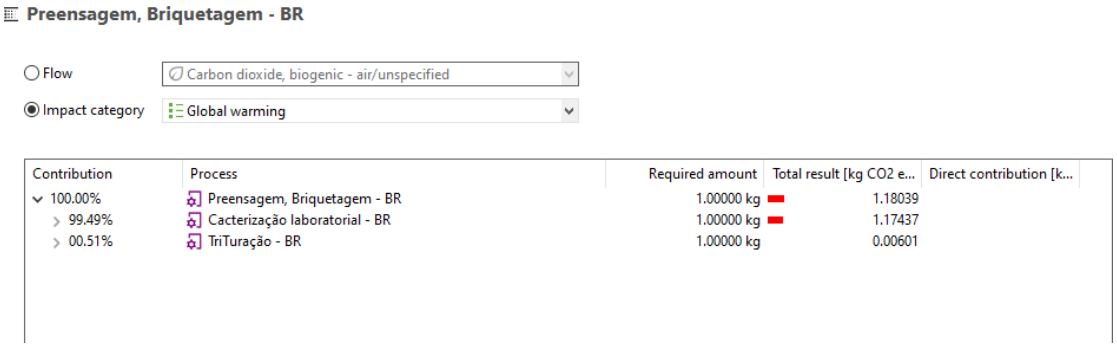
A simulação computacional executada no OpenLCA computou o impacto ambiental agregado de mudanças climáticas em 1,180 kg CO_2-eq por quilograma de briquete produzido. Este valor demonstra o baixo impacto ambiental e a elevada sustentabilidade da cadeia produtiva de conversão termoquímica proposta, principalmente quando comparada à pegada de carbono associada à produção convencional de carvão vegetal de origem fóssil ou florestal não manejada.

Aprofundando a árvore de contribuição (Contribution Tree) gerada pelo OpenLCA, o estudo identificou que a quase totalidade do impacto ambiental está associada de forma indireta ao consumo de eletricidade proveniente da rede interligada. Na decomposição das fontes energéticas componentes do mix elétrico regionalizado do Ceará, constatou-se que a geração térmica a carvão mineral, embora represente apenas 10,99% da capacidade instalada da matriz do estado, foi a responsável direta por 0,796 kg CO_2-eq, aproximadamente 67,4% do impacto total. Isto se deve ao elevadíssimo fator de emissão do carvão mineral (0,820 kg CO_2/KWh, IPCC). Em contrapartida, as fontes, eólica e solar fotovoltaica, que juntas dominam cerca de 79,69% do mix de geração cearense, apresentaram contribuições significativamente baixas (0,042 kg CO_2-eq e 0,153 kg CO_2-eq, respectivamente), provando que a regionalização de inventários no OpenLCA atenua distorções provocadas pela aplicação de inventários estrangeiros estáticos.

Em contrapartida, o gás natural apresentou impacto desprezível no modelo, visto que sua geração de 3 GWh indica que essas termelétricas operaram apenas como reserva de segurança do sistema local.

4.2.2 Interpretação

Figura 10- Percentagens das etapas



Fonte: OpenLca (2026)

A análise de sensibilidade das etapas operacionais do modelo Gate-to-Gate gerou uma distribuição de impacto altamente concentrada. A etapa de caracterização laboratorial isto é, a análise imediata configurou-se como o principal gargalo do sistema, respondendo por impressionantes 99,49% do impacto de aquecimento global (1,17437 kg CO_2-eq). Este comportamento crítico decorre diretamente do balanço energético quantificado na Tabela 3 da metodologia: a estufa de circulação forçada (561,77 W operando por 6 horas) e a mufla de calcinação (operando por 10 horas) demandaram, juntas, um montante massivo de 7,421 KWh de eletricidade para processar frações gramáticas de amostra.

A etapa de trituração mecânica em liquidificador industrial representou um gargalo secundário de apenas 0,51% do impacto (0,00601 kg CO_2-eq), associado ao consumo elétrico reduzido de 0,038 KWh devido à rapidez da operação (10 minutos). A etapa de secagem solar ao ar livre e a prensa hidráulica manual registraram impacto zero no software, validando as premissas ecológicas de projeto. Como estratégia de ecoeficiência industrial para mitigar o gargalo identificado na caracterização, recomenda-se a integração de sistemas de microgeração solar fotovoltaica dedicados ao suprimento energético do laboratório no Campus Auroras ou a substituição de fornos elétricos intermitentes por sistemas de aquecimento direto a gás ou biomassa em escala contínua.

Estes resultados se alinham com as ideias de Sfeir (2013) que revela que a etapa de secagem com a estufa é uma das mais intensivas em energia para a produção de pellets e ou briquetes. No entanto, para Garcia et al. (2018), o alto custo de eletricidade influencia o aumento de preços finais dos briquetes.Assim, a secagem solar por um lado, foi uma alternativa para a redução do custo de eletricidade, entretanto por outro lado, apresentou desvantagens concernentes ao tempo de secagem e a possibilidade de reduzir a qualidade da biomassa conforme (LIMA, 2016) aponta.

Apesar da regionalização dos dados, essa ferramenta de análise do ciclo de vida (ACV), OpenLca, apresentou ser versátil e em constante atualização, o que permite retrabalhar os dados, buscando assim os resultados mais próximos da realidade. É necessário buscar melhorias concernente ao Mix Elétrico do Ceará, e a possibilidade do uso de energias renováveis diretas.

5 CONCLUSÃO

A construção do inventário do ciclo de vida para a produção de briquetes de casca de coco tornou-se uma das etapas fundamentais para mapear os fluxos de massa e energia do processo. Os dados coletados na fase de laboratório, que englobam desde a secagem solar natural até a compactação física, permitiram quantificar de forma precisa os *inputs* e os *outputs* do sistema. A identificação detalhada desses fluxos evidenciou que a etapa de caracterização laboratorial, isto é, análise imediata representou o principal gargalo energético e ambiental do inventário, sendo responsável por 99,49% do impacto total devido ao uso intensivo de equipamentos de alta potência. Por outro lado, a viabilidade técnica da biomassa foi confirmada pelos excelentes parâmetros físico-químicos obtidos, com destaque para o Teor de Umidade de $9{,}10\ \% \pm 0{,}20$ e o Poder Calorífico Superior (PCS) de 18,53 MJ/kg, o que qualifica o resíduo da casca de coco como um substituto promissor para os combustíveis sólidos tradicionais como a lenha.

Quanto à avaliação do ciclo de vida dos sistemas energéticos no contexto regional do Estado do Ceará, a análise revelou pontos benéficos tanto sociais quanto ambientais. Isto porque, na ótica ambiental, o impacto foi de 1,180 kg $CO_2 - eq,$ por quilograma de briquete, que reflete uma pegada de carbono relativamente baixa, mas fortemente dependente de forma indireta às fontes fósseis, como o carvão mineral para a estabilização da rede elétrica interligada, mesmo diante de uma matriz regional com expressiva participação de eólica e solar. Assim, o aproveitamento do resíduo lignocelulósico no Maciço de Baturité apresentou um cenário favorável para a inserção na cadeia de valor de biocombustíveis, promovendo a transição energética local. Socialmente, a valorização dessa biomassa agrícola contribui para mitigar o descarte inadequado de resíduos em aterros ou lixões na região e consequentemente alavancar a economia.

Ademais, foi possível validar o software OpenLCA (versão 2.6.0) integrado ao banco de dados SICV Brasil como uma ferramenta robusta, acessível e eficaz para a modelagem de sistemas de bioenergia. A aplicação do método ReCiPe Midpoint 2016 (H) sob a abordagem "do portão ao portão" (Gate-to-Gate) permitiu rastrear com precisão matemática os indicadores de potencial de aquecimento global em cada fase, desde a coleta, a secagem, a trituração e a prensagem. A flexibilidade do software viabilizou a regionalização da matriz elétrica de baixa tensão do Ceará e a inserção de taxas estimadas de perdas na rede de distribuição. Desse modo, o OpenLCA demonstrou ser um recurso científico indispensável para

a tomada de decisão concernente a produção de briquetes de casca de coco, evidenciando que softwares livres possuem a confiabilidade necessária para simular e otimizar processos reais de mitigação ambiental e transição energética.

REFERÊNCIAS

ABNT,2009ª.
ACV - Ibict - **Avaliação do Ciclo de Vida**. Disponível em: http://acv.ibict.br/. Acesso em: 21 abr 2026.

ACV BRASIL. **Softwares**. Disponível em: https://acvbrasil.com.br/softwares. Acesso em: 26 nov 2025.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (Brasil) (ANEEL). **Atlas de Energia**

AGRAWAL, K. K.; JAIN, S.; JAIN, A. K.; JAIN, A. K.; DAHIYA, S. **A life cycle**

ALAKANGAS, E. **Bionergy in Finland. In: EUBIONET. International Training Programme: wood fuel production for small scale and district heating plants**. Joensuu, 2005.

ALVES, D.A.H. **Avaliação do potencial energético de resíduos de produção agrícola provenientes do beneficiamento da mandioca e do milho**. 2014. 80p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2014.

BARBOSA, P. F. D.; ROCHA, J. D. **Produção de briquetes e péletes a partir de resíduos agrícolas, agroindustriais e florestais**. Brasília, DF: Embrapa Agroenergia, 2012. 130 p. (Embrapa Agroenergia. Documentos, 13).

BEZERRA. J. et al., **Estudo de potencial energético de briquetes produzidos a partir de resíduos de casca de coco verde e bagaço de cana**, IX Simpósio Brasileiro de Engenharia Ambiental, XV Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Ambiental e III Fórum Latino Americano de Engenharia e Sustentabilidade. Belo Horizonte. 2017.

BILBA, K. et al., **Study of banana and coconut fibers**: Botanical composition, thermal degradation and textural observations. BIORESOURCE TECHNOLOGY, 98(1), p. 58-68, 2007.

BIOMACHINE. **Briquetes** 2007. Disponível em: http://www.biomachine.com.br/biomachine.asp. Acesso em: 2 set 2025
BIOMASSA DERIVADA DA CASCA DE COCO VERDE, Trabalho de Graduação apresentado ao Departamento de Engenharia Química da Universidade Federal de São Carlos para obtenção do Bacharelado em Engenharia Química. 2025.

BIOMAX. **Indústria de máquinas LTDA** – Disponível em:https://www.biomaxind.com.br/briquetagem/ . Acesso em: 2 de jan. 2026.

BITENCOURT, D. V.; PEDROTTI, A.; ALMEIDA, R. N. **A fibra da casca do coco verde e a fabricação de briquetes**: um estudo de suas potencialidades. Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais, Aquidabã, v.5, n.1, p.319-328, 2014. DOI: http://dx.doi.org/10.6008/SPC2179 6858.2014.001.0023

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. **Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos.** Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 3 ago. 2010. Disponível em: Lei nº 12.305/2010. Acesso em: 24 mai 2026.

CARVALHO, G.V., **Análise do potencial energético dos resíduos da casca do coco verde gerados no município de Paraipaba/ CE proposta de uma planta térmica**. Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso

de Engenharia de Energias Renováveis, Fortaleza, 2023.
casca de coco para uso energético. Brasilian Journal of Production Engineering, vol.5, p.179-195, Brasil, 2019.
CEZAR, E., **Produção de energia com resíduos da agropecuária**. Portal Embrapa, Notícias,

CHAVES, A. M. B. et al., **Avaliação do potencial de compactação de resíduos lignocelulósicos para fins energéticos**. Revista Árvore, Viçosa, v. 37, n. 4, p. 763-771, 2013.

CHAVES, A. M. B; VALE, A. T.; MELIDO, R. C. N.; e ZOCH, V. P. (2013). **Características**

CHEN, L.; XING, L.; HAN, L. **Renewable energy from agro-residues in China**: solid biofuels and biomass briquetting technology. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v.13, n.9, p.2689-2695, 2009.
D.; VERAS, L. de G. C. **Beneficiamento da casca de coco verde**. Fortaleza: Embrapa Agroindústria Tropical, 2011.

D'AMATO, D. et al., Green, circular, bio economy: A review of conceptual frameworks and policies. **Forest Policy and Economics**, v. 85, p. 32-45, 2017.

DIAS, et al., **Briquetes de fibra da casca do coco verde-Energia e Sustentabilidade**, REVISTA ARACÊ, São José dos Pinhais, v.8, n.1, p.1-19, 2026.

DIAS, J. M. C. S.; SOUZA, D. T.; BRAGA, M.; ONOYAMA, M. M.; MIRANDA, C. H. B.;

DIAS, N. B., SCHNEIDER, P. Z., CHAVES, G. L. D., CELESTE, W. C. **Aproveitamento da Elétrica**. Disponível em: http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/04 Energia_Hidraulica(2).pdf> Acesso em: 19 jan. 2026.

EMBRAPA (2015). **Propostas para o aproveitamento do potencial energético da casca do coco-verde**. Brasília: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Disponível https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/3301723/propostas-para-o aproveitamento-do-potencial-energetico-da-casca-do-coco-verde. Acesso 16 jan. 2026.

Embrapa Agroindústria Tropical, 2014. OLIVEIRA, Jéssica Christine Gonçalves de. **Processos de valorização dos resíduos do coco**. Rio de Janeiro, 2017. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos) – Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.

EMBRAPA. **VII Plano Diretor da Embrapa**: 2020–2030. Brasília, DF, 2020. 31 p

EMBRAPA: **Beneficiamento da casca de coco verde para a produção de fibra e pó**. Disponível em: https://www.embrapa.br/busca-de-solucoes-tecnologicas/-/produto-servico/33/beneficiamento-da-casca-de-coco-verde-para-a-producao-de-fibra-e-po. Acesso em 25 abr 2025.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). (2012) EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Balanço Energético Nacional 2025: Relatório Síntese – ano base 2024**. Rio de Janeiro: EPE, 2025.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Balanço Energético Nacional 2025: ano base 2024**. Rio de Janeiro: EPE, 2025.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **PDE 2034: estudos do Plano Decenal de Expansão de Energia 2034: consolidação de resultados.** Brasília, DF: EPE, 2024. Disponível em: https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/sntep/publicacoes/plano-decenal-de-expansao-de-energia/pde-2034/cadernos/pde-2034_consolidacao-de-

resultados_20241106.pdf/view. Acesso em: 24 mai 2026.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). (2012**) Produção de briquetes e pellets a partir de resíduos agrícolas, agroindustriais e florestais. Brasília**: Embrapa Agroenergia. 130 p, 2012.

EPE. **Matriz Energética e Elétrica**. 2022. Disponível em: https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica. Acesso em: 21 mai 2025.

ESCOBAR, J. C. et al. **Biofuels: Environment, technology and food security**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 13, n. 6-7, p. 1275–1287, ago. 2009.
F. M. **Aproveitamento de resíduos vegetais para a produção de briquetes**. Revista brasileira de Ciências Ambientais, p. 22-29, 2014.

FAN, J. et al. Life cycle assessment of environmental impacts of bioenergy production from agricultural residues. **Environmental Science & Technology**, v. 45, n. 22, p. 9720-9727, 2011.

FAO. **Statistics. Food and Agriculture Organization of the United Nations**.2025

FERREIRA, A.F.B., et al., **Caracterização Energética da Fibra da Casca do Coco com Posterior Produção de Briquete**. In: Congresso Brasileiro De Engenharia Química, XXI, Fortaleza, 2016. Disponível https://proceedings.science/cobeq/cobeq 2016/trabalhos/caracterizacao-energetica-da-fibra-da-casca-do-coco-com-posterior-producao de-briquete?lang=pt-br. Acesso 20 mai 2026.

FERREIRA, Kawany K. C et al**. PIRÓLISE E CO-PIRÓLISE DAS CASCAS DE PEQUI E BABAÇU: UMA ABORDAGEM SUSTENTÁVEL PARA O APROVEITAMENTO DE RESÍDUOS,** São João del-Rei, 35701-970 Sete Lagoas – MG, 2025.

FIGUEIRA, R. M. **Análise imediata e poder calorífico de briquetes de resíduos agrícolas e florestais.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 15, n. 6, p. 620-627, 2011.

GARCIA, R. et al. **Life cycle assessment of biomass briquetting as a sustainable waste management strategy.** Journal of Cleaner Production, v. 172, p. 3205-3214, 2018.

GONZÁLEZ-GARCÍA, S. et al. **Life cycle assessment of two alternative bioenergy systems involving Salix spp**. biomass: Bioethanol production and power generation. Applied Energy,

GREENDELTA. **openLCA 2.6.0 software**, 2026

GreenDelta. **OpenLCA. Tutorial**: Basic Modelling in OpenLCA, 2020.
https://periodicos.ifpb.edu.br/index.php/principia/article/view/5876. Acesso em: 23 mai 2026.

IBICT (INSTITUTO BRASILEIRO DE INFORMAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA).
INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 14040:**

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO**). ISO 14043:**

IPCC **Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate Change 2025**: Synthesis Report, Summary for Policymakers. 2014. 32 p.

ISO - **INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR**

KLAUTAU, V. P. **Análise experimental de uma fornalha a lenha de fluxo de corrente para a secagem de grãos**. Curitiba, 28 p., 2008. Dissertação (Mestrado em engenharia de recursos

hídricos e ambiental) – Universidade Federal do Paraná, 2008.

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

LIMA, E.B.C.; SOUSA, C.N.S.; MENESES, L.N.; XIMENES, N.C.; SANTOS-JUNIOR,

LOPES, V.S., **Briquete de coco como alternativa energética.** 2014. 32 f. TCC (graduação em Ciências Econômicas) - Universidade Federal do Ceará, Faculdade de Economia, Administração, Atuária e Contabilidade, Fortaleza/CE, 2014.
M.A. e VASCONCELOS, G.S. (2015). **Cocos nucifera Linn (Arecaceae):** a phytochemical and pharmacological review, Brazilian Journal of Medical and Biological Research, vol.48, p.953-964.
MACHADO, Adilson Geraldo et al. Aproveitamento energético dos rejeitos da triagem de resíduos sólidos urbanos combinados com biomassa: uma opção energética para a região sul de Santa Catarina. 2022

MANHEIM, M. et al. Advanced life cycle assessment modeling in openLCA: databases and method integration. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 26, p. 1102-1115, 2021.

MARAFON, A.C. et al. **Aproveitamento de cascas de coco para geração de energia térmica: potencialidades e desafios**. Embrapa Tabuleiros Costeiros. Aracaju, SE. Dezembro, 2019. Disponível em: https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1119514/1/DOC234.pdf
Acesso em: 24 fev 2026.

MARAFON, A.C. et al. **Reciclagem das cascas de coco verde no contexto da economia circular**: briquetagem e pirólise. Embrapa Tabuleiros Costeiros. Aracaju, SE. Dezembro, 2020.

MARTINS, L. **CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA E POTENCIAL ENERGÉTICO DA**
MATTOS, A. L. A.; ROSA, M. D. F.; CRISÓSTOMO, L. A.; BEZERRA, F. C.; CORREIA,

MEIRIELE, V, et al., **Reaproveitamento de resíduos sólidos da casca de coco em descarte na avenida Beira Tio na cidade de Itumbiara-,** 22º Congresso Nacional de Meio Ambiente de Poços de Calda, 2025.

MIOLA, B; FROTA, M. M. M.; OLIVEIRA, A. G.; UCHÔA, K. M.; LEANDRO FILHO, F.

MOREIRA, V; MONTEIRO, A; VIEIRA, G. **Gestão do resíduo do coco verde no Brasil para fins de mitigação das mudanças climáticas**, Universidade Federal Fluminense, XVI Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental Recife/PE , 2025.

MOURAD, A., L. et al. Aplicação da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) em cadeias produtivas agroindustriais no Brasil. **Ambiente & Sociedade**, v. 18, p. 120-135, 2015.

NAKASHIMA, G. T.; MARTINS, M. P.; SILVA, D. A.; CHRISOSTOMO, W.; e YAMAJI,

NHABANGA, H. **Aplicação do Software OpenLCA na Avaliação do Ciclo de Vida de Embalagens e Recipientes Plásticos na empresa Topack Moçambique**. Trabalho de Conclusão de Curso, Curso de Engenharia do Ambiente, Moçambique, 2023.

NOI, C, CIROTH.A, SCROCKA. M. **OpenLCA 1.7. Comprehensive User Manual**, GreenDelta, 2017.

NORMAS BRASILEIRAS (NBR). **ISO 14040:** environmental management – life cycle

assessment – principles and framework. International Organization for Standardization, Geneva, 2001.

OLIVEIRA FILHO, J,C.; SILVA, R. F., **Utilização da casca do coco verde para fabricação de briquetes**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Instituto Federal de Pernambuco, Campus Recife, Recife, 2022.

OLIVEIRA, J. **Processos de valorização dos resíduos do**. Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos da Escola de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2017.

PAZ, E. C. S.; OLIVEIRA, R. L. A.; PEDROZA, M. M.; PAZ, R. R. S.; SILVA, E. M.;

PETRICOSKI, S. **Briquetes produzidos com mistura de podas urbanas, glicerina e resíduos de processamento de mandioca**. 2017. 95p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Energia na Agricultura), Universidade Estadual do Oeste de Paraná,
Produção de briquetes e pellets a partir de resíduos agrícolas, agroindustriais e florestais. Brasília: Embrapa Agroenergia. 130 p. (Documentos / Embrapa Agroenergia.)

QUIRINO, W. F. **Utilização energética de resíduos vegetais**, 2000.
R. S.; MACÊDO, E. N.; e ICHIHARA, J. A. (2008). **Combustão e gasificação de biomassa sólida: soluções energéticas para a amazônia**. 1ª ed. Brasília.
RENDEIRO, G.; NOGUEIRA, M. F. M.; BRASIL, A. C. M.; CRUZ, D. O. A.; GUERRA, D. S. E. **Obtenção de celulose a partir do aproveitamento de resíduos de coco (Cocos nucifera Linnaeus, 1753) para a produção de papel.** Revista Principia, *[S. l.]*, v. 60, n. 1, p. 1–20, 2023. DOI: 10.18265/1517-0306a2021id5876. Disponível em:
SANTOS, F. H. D. dos; LOPES, E. J. de S.; MIRANDA, R. M.; FIGUEIREDO, C. A.; SILVA, F. L. da; SILVA, G. B. da. Otimização da produção de briquetes de biomassa: influência de tempo e pressão na compactação, na estabilidade dimensional e no potencial energético sustentável. **Revista Principia**, *[S. l.]*, v. 63, 2026. DOI: 10.18265/2447-9187a2026id9155. Disponível em: https://periodicos.ifpb.edu.br/index.php/principia/article/view/9155. Acesso em: 14 jun. 2026.
SANTOS, M. L. G**. Estudo dos produtos da pirólise e potencial energético da fibra de coco da baía**. VII Congresso Brasileiro de Energia Solar – Gramado, 2018.

SAXENA, R. C.; ADHIKARI, D. K.; GOYAL, H. B**. Biomass-based energy fuel through biochemical routes**: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 13, n. 1, p. 167–178, jan. 2009.

Secretaria do Meio Ambiente e Mudança do Clima do Governo do Estado do Ceará e ICLEI – Governos Locais pela Sustentabilidade. **Inventário de Emissões de Gases de Efeito Estufa do Estado do Ceará.** São Paulo: Governo do Estado do Ceará e ICLEI, 2025.

SEYE, O. **Análise de ciclo de vida aplicada ao processo produtivo de cerâmica estrutural tendo como insumo energético capim elefante (Pennisetum purpureum Schaum)**. Tese (Doutorado) — Universidade Estadual de Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, 2003.

SFEIR, T. A.**, Avaliação do ciclo de vida de produção de pellets de madeira utilizando o software livre.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

SFEIR, T. A;. **Avaliação do ciclo de vida de produção de pellets de madeira utilizando o software livre**, 2013.

SHARLYENE G. R. S., **Os desafios de Reutilização dos Resíduos do Coco Verde gerados em São Luís de Maranhão**, 2024. 52 p.

SHRESTHA, B.; BHATTACHARYA, S. C. Environmental and sustainability indicators for

biomass briquetting systems. **Energy for Sustainable Development**, v. 14, n. 3, p. 210-222, 2010.

SILVA, D. A. L.; FILLETI, R. A. P.; MUSULE, R.; MATHEUS, T.T.; FREIRE, F., **A**

SILVA, S. A. et al. Estudo da viabilidade técnica da produção de briquetes a partir do resíduo da casca do coco verde (*Cocos nucifera L.*). **Revista Matéria**, v. 22, n. 4, 2017.

SILVA, T. K. M. A., **Alternativas para o reaproveitamento do resíduo de coco**. 2025, 11f. TCC - Curso de Gestão De Recursos Hídricos, Ambientais e Energéticos, Instituto de Engenharias e Desenvolvimento Sustentável, Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira, Redenção-Ceará, 2025.

SILVA, T. K. M. A; BARROS, A. C. S. **Alternativas para o reaproveitamento do resíduo de**. 2025

SILVA, T. T.; MULDER, A. P.; e SANTANA, I. (2021**). Coqueiro (Cocos nucifera L.) e produtos alimentícios derivados**: Uma revisão sobre aspectos de produção, tecnológicos e nutricionais. Revista Tecnologia de Alimentos: Tópicos Físicos, Químicos e Biológicos, vol.2, p.80-101.

SILVEIRA, M. S. **Aproveitamento das cascas de coco verde para produção de briquete em Salvador - BA**. 163 f. Dissertação (Mestrado em Gerenciamento e Tecnologias Ambientais no Processo Produtivo) - Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, 2008.
SINDICOCO - PORTAL SUSTENTABILIDADE. **Os impactos da casca do coco verde frente à ODS** 11. Disponível em: https://portalsustentabilidade.com/2023/08/03/os-impactos-da-casca-do-coco-verde frente-a-ods11/. Acesso em: 19 fev 2025.

SOUZA, M. E. S. de; SILVA, J. R. A. da; SANTOS, C. C. L. dos; SILVA, H. C. da; LIMA, P. **STANDARDIZATION.Environmental management – Life Cycle Assessment**- ISO **systematic review and life cycle assessment of biomass pellets and briquettes production in Latin America**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 157, p.112042, 2022. https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.112042.

TAQUIDIR, J.U. **Utilização de resíduos de coco seco carbonizados para a produção de briquetes**. Relatório de Trabalho de Licenciatura. Departamento de Engenharia química, Maputo, 2024.

UBANDO, A. T. et al. **A comprehensive review of life cycle assessment (LCA) of microalgal and lignocellulosic bioenergy products from thermochemical processes**. Bioresource Technology, v. 291, p. 121837–121837, 19 jul. 2019.
v. 95, p. 111–122, jul. 2012

VALE, A. T. do; BARROS, L. O.; QUIRINO, W.J.; MOREIRA, A. C. O. **Densidade**

VALE, A.T.; GENTIL, L.V. **Produção e uso energético de biomassa e resíduos agroflorestais**. Tecnologias aplicadas ao setor madeireiro III. Rio Branco: Suprema, p.195-241, 2008.

VAN DAM, J ; E. G.*et al*. Process for production of high density/high performance binderless boards from whole coconut husk: Part 2: Coconut husk morphology, composition and properties. **Industrial Crops and Products**, v. 24, n. 2, p. 96-104, 2006.

VIANA, M. M. *et al*. Avaliação do ciclo de vida da geração de energia a partir de resíduos agrícolas. **Journal of Cleaner Production / Anais do Congresso Brasileiro de ACV**, 2014.

VIEIRA, A.C.M. **Caracterização da biomassa proveniente de resíduos agrícolas para geração de energia**. 56p. Dissertação (Mestrado de Energia na Agricultura), Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2012.

WILLERS, C. D. *et al*. **Metodologias de avaliação de impacto ambiental**: uma análise comparativa do método ReCiPe. Revista de Gestão Ambiental e Sustentabilidade, v. 2, n. 1, p. 45-68, 2013.