



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL

Júlia França Alvarenga

**Avaliação dos impactos ambientais devido à implantação de um
projeto de Mecanismo de Desenvolvimento Limpo de troca de combustível**

Florianópolis
2022

Júlia França Alvarenga

**Avaliação dos impactos ambientais devido à implantação de um
projeto de Mecanismo de Desenvolvimento Limpo de troca de combustível**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Ambiental da Universidade Federal de
Santa Catarina para obtenção do título de mestre em
Engenharia Ambiental
Orientador: Prof. Dr. Sebastião Roberto Soares
Coorientador: Prof. Dr. Henrique Rogerio Antunes de
Souza Junior

Florianópolis

2022

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Alvarenga, Júlia França

Avaliação dos impactos ambientais devido à implantação de um projeto de Mecanismo de Desenvolvimento Limpo de troca de combustível / Júlia França Alvarenga ; orientador, Sebastião Roberto Soares, coorientador, Henrique Rogerio Antunes de Souza Junior , 2022.

102 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Florianópolis, 2022.

Inclui referências.

1. Engenharia Ambiental. 2. Avaliação do Ciclo de Vida. 3. Avaliação ambiental. 4. Mecanismo de Desenvolvimento Limpo. I. Soares, Sebastião Roberto. II. Souza Junior , Henrique Rogerio Antunes de. III. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental. IV. Título.

Júlia França Alvarenga

Avaliação dos impactos ambientais devido à implantação de um projeto de Mecanismo de Desenvolvimento Limpo de troca de combustível

O presente trabalho em nível de mestrado foi avaliado e aprovado por banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof.(a) Rodrigo de Almeida Mohedano, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Thiago Oliveira Rodrigues, Dr.
Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia

Certificamos que esta é a **versão original e final** do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de mestre em Engenharia Ambiental.

Coordenação do Programa de Pós-Graduação

Prof. Sebastião Roberto Soares, Dr.
Orientador

Florianópolis, 2022.

Dedico este trabalho aos meus amigos do Ciclog.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar eu queria agradecer à Ju Albano por ter me falado na festa junina da turma que ia abrir inscrição pro mestrado na UFSC e que eu devia me inscrever. Na época eu estava numa certa crise profissional e entre a inscrição e a entrega do pré-projeto foram muitos altos e baixos, inclusive pensar em desistir antes de tentar, mas quem nunca, não é mesmo? Agradeço especialmente à Ana que, não bastasse o apoio de sempre, ainda foi comigo pra Floripa quando eu fui fazer a prova do processo seletivo. Foi a primeira vez que pisei na ilha, fui uns dias antes pra conhecer as famosas praias maravilhosas e choveu daquele jeito que chove em Floripa. Agradeço também a Julia e Rebeca pelo apoio nessa etapa e durante todo o curso, ainda que estivéssemos a centenas de quilômetros de distância. E um agradecimento especial à Kátia, que me ajudou a decidir cursar o mestrado quando saiu o resultado e eu ainda não sabia se ia porque estava perdida demais nos meus diversos interesses na área ambiental para conseguir me decidir.

Agradeço aos meus pais pelo apoio durante todo esse período, e por terem sido ouvido para reclamações nos momentos difíceis. Agradeço muito aos colegas do Ciclog, mas especialmente Flávia, Carla, Thales, Henrique, Roni e Luis. Agradeço pelos incontáveis papos no café, pela aposta de quem compra o bolo da feirinha nas quartas e pelos rolês legais em Floripa e Curitiba. Agradeço a vocês sobretudo pelo acolhimento e por terem me mostrado o quanto um trabalho acadêmico pode ser feito em equipe. Ao Henrique, além disso tudo, agradeço muito pela paciência, pelas trocas e por ter topado o desafio de ser meu co-orientador quando a gente mal se conhecia. Ao professor Sebastião, pela oportunidade e confiança no meu trabalho.

Também agradeço muito ao Faria, que me apoiou tanto que chegou a cursar um semestre acadêmico na UFSC para que a gente pudesse ficar mais perto, e perto da praia, claro. No meio do caminho todos os planos mudaram por causa da pandemia e acabei deixando Floripa e terminando o mestrado à distância. Nesse contexto louco, não me faltou apoio, seja das pessoas que já mencionei aqui e de tantas outras pessoas queridas. Um agradecimento especial pra Lu Pires, Lu Nunes e Isa, porque apoio não faltou e porque vocês sempre estiveram aí pra me ouvir e pra espairecer. Por fim, pelos encontros que a vida proporcionou que permitiram que eu aprendesse muito junto com outras pessoas sobre temas muito além da dissertação, mas sempre permeados pela crise climática, agradeço à Samantha, aos amigos da SDSN Youth e às pessoas incríveis que a Cristal reuniu pra discutir como adiar o fim do mundo no Clube Uma Vida Sem Lixo.

RESUMO

O Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), concebido em 1997 no Protocolo de Quioto, consiste em uma forma de comercializar emissões de gases de efeito estufa (GEE) entre países que reduzem emissões além das metas acordadas em tratados internacionais e países que não atingem suas metas de redução. Para tanto, o MDL inclui centenas de metodologias certificadas pela Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC) para contabilizar a redução de GEE a ser comercializada. Em paralelo a isso, a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é uma metodologia consolidada que permite quantificar uma série de impactos ambientais, incluindo as emissões de GEE. É importante garantir que a implantação de projetos de MDL não apenas assegure a redução de emissões, mas também não cause impactos ambientais colaterais, o que poderia tornar o mecanismo danoso do ponto de vista ambiental. Neste contexto, este trabalho utilizou ACV Organizacional (ACV-O) para avaliar a transferência de impactos ambientais de Aquecimento Global para outras áreas após a implantação de um projeto de MDL. Assim, foram avaliados dois cenários com base na Metodologia Consolidada para Geração de Eletricidade e Calor a partir de Biomassa da UNFCCC, sendo um cenário antes e o outro após a implementação de um projeto de MDL de substituição de combustíveis fósseis por biomassa na caldeira de uma indústria. A caldeira no cenário 1 (com carvão e óleo) é responsável pela geração de vapor, enquanto a caldeira do cenário 2 (com biomassa residual), além de vapor, gera parte da eletricidade consumida nos processos industriais. Para a ACV-O, foi utilizado o método de avaliação de impacto ReCiPe 2016 *midpoint* (H), e todas as 18 categorias de impacto foram avaliadas. Os resultados indicaram que o projeto de MDL analisado reduz em 32% a categoria Aquecimento Global da ACV-O, além de potenciais reduções de impacto ambiental para as outras 17 categorias de impacto, chegando até aproximadamente 70% para Eutrofização de Água Doce, Ecotoxicidade Terrestre e Depleção de Ozônio Estratosférico. Os resultados indicaram que a ACV-O permite uma visão mais abrangente do processo de produção, de forma que essa metodologia pode ser utilizada como uma avaliação adicional de um projeto de MDL. Porém, ainda há uma lacuna de trabalhos acadêmicos com essa abordagem comparativa, de forma que não se pode extrapolar para outros cenários os resultados e conclusões aqui apresentados. Este trabalho pode, entretanto, auxiliar pesquisas futuras em relação à análise ambiental do MDL.

Palavras-chave: ACV; Avaliação do Ciclo de Vida Organizacional; Mecanismo de Desenvolvimento Limpo, Mudanças Climáticas, Gases de efeito estufa, biomassa.

ABSTRACT

The Clean Development Mechanism (CDM), conceived in 1997 in the Kyoto Protocol, is a way of trading emissions between countries that reduce their greenhouse gases (GHG) beyond the agreed international targets and countries that do not meet their reduction targets. For this purpose, the CDM includes hundreds of methodologies certified by the United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) to account for the GHG reduction to be commercialized. In addition to this, Life Cycle Assessment (LCA) is a consolidated methodology that allows quantifying a series of environmental impacts, including GHG emissions. It is important to ensure that the implementation of CDM projects not only guarantees the reduction of emissions but also does not cause collateral environmental impacts, which could make the mechanism environmentally damaging. This work used LCA applied to organizations, also known as Organizational LCA (O-LCA), to assess environmental impact trade-offs from Global Warming to other areas after the implementation of a CDM project. Two scenarios were evaluated based on UNFCCC's Consolidated Methodology for Electricity and Heat Generation from Biomass, being one scenario before and the other after the implementation of a CDM project of fossil fuel exchange for biomass in an industry's boiler. The boiler of scenario 1 (containing coal and oil) generates steam, while the boiler of scenario 2 (containing residual biomass), besides generating steam, produces part of the electricity consumed in the industrial processes. For the O-LCA, impact assessment method ReCiPe 2016 midpoint (H) was used and all its 18 impact categories were evaluated. The results indicated that in the analyzed CDM project, the global warming category reduced by 32%, while O-LCA identified potential environmental impact reductions for the other 17 impact categories, reaching up to approximately 70% for Freshwater Eutrophication, Terrestrial Ecotoxicity and Stratospheric Ozone Depletion. The results indicated that O-LCA allows a more comprehensive view of the production process so that this methodology can be used as an additional evaluation of a CDM project. However, there is still a gap in academic works with this comparative approach, so that the results and conclusions of this work cannot be extrapolated to other scenarios. It can, however, assist future research with regard to the environmental analysis of the CDM.

Keywords: LCA; Organizational Life Cycle Assessment; Clean Development Mechanism, Climate Change, Greenhouse Gases, Biomass.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Linha do tempo: breve histórico do cenário climático internacional.	25
Figura 2 – Etapas para a obtenção de RCE.	28
Figura 3 – Fases de um estudo de ACV	31
Figura 4 – Etapas metodológicas deste trabalho.	42
Figura 5 – Representação do cenário de linha de base (cenário 1) e do cenário de projeto (cenário 2).	43
Figura 6 – Processo produtivo dos cenários 1 e 2 com destaque para a diferença entre eles...	45
Figura 7 – Fronteira do sistema.	58
Figura 8 – Comparação entre os resultados dos cenários 1 e 2.	69
Figura 9 – Comparação entre os perfis dos resultados dos cenários 1 e 2 (parte 1).	71
Figura 10 – Comparação entre os perfis dos resultados dos cenários 1 e 2 (parte 2).	72
Figura 11 – Comparação entre os perfis dos resultados dos cenários 1 e 2 (parte 3).	73
Figura 12 – Comparação entre os perfis dos resultados dos cenários 1 e 2 (parte 4).	74

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Ferramentas que compõem a metodologia ACM0006.	51
Quadro 2 – Categoria Formação de Material Particulado.	62
Quadro 3 – Categoria Depleção de Recursos Fósseis.	62
Quadro 4 – Categoria Ecotoxicidade Aquática.	62
Quadro 5 – Categoria Eutrofização de Água Doce.	62
Quadro 6 – Categoria Aquecimento Global.	62
Quadro 7 – Categoria Toxicidade Humana Carcinogênica.	63
Quadro 8 – Categoria Toxicidade Humana Não-Carcinogênica.	63
Quadro 9 – Categoria Radiação Ionizante.	63
Quadro 10 – Categoria Uso do Solo.	63
Quadro 11 – Categoria Ecotoxicidade Marinha.	63
Quadro 12 – Categoria Eutrofização Marinha.	64
Quadro 13 – Categoria Escassez de Recursos Minerais.	64
Quadro 14 – Categoria Formação de Ozônio (saúde humana).	64
Quadro 15 – Categoria Formação de Ozônio (ecossistemas terrestres).	64
Quadro 16 – Categoria Depleção de Ozônio Estratosférico.	64
Quadro 17 – Categoria Acidificação Terrestre.	65
Quadro 18 – Categoria Ecotoxicidade Terrestre.	65
Quadro 19 – Categoria Consumo de Água.	65
Quadro 20 – Etapas da pesquisa.	68

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Elementos críticos ao definir o escopo de ACV e ACV-O.	35
Tabela 2 – Tabela-resumo: categorias de impacto e seus respectivos <i>drivers</i>	82

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACV	Avaliação do Ciclo de Vida
ACV-O	Avaliação do Ciclo de Vida Organizacional
AG	Aquecimento Global
AICV	Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida
AND	Autoridade Nacional Designada
AR5	5º Relatório de Avaliação
AT	Acidificação Terrestre
BM	<i>Build margin</i> (margem de construção)
CA	Consumo de Água
CM	<i>Combined margin</i> (margem combinada)
COP	<i>Conference of the Parties</i> (Conferência das Partes)
DCP	Documento de Concepção do Projeto
DOE	Depleção de Ozônio Estratosférico
DRF	Depleção de Recursos Fósseis
EcoAD	Ecotoxicidade de Água Doce
EcoM	Ecotoxicidade Marinha
EOD	Entidade Operacional Designada
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
ERM	Escassez de Recursos Minerais
ET	Ecotoxicidade Terrestre
EutAD	Eutrofização de Água Doce
EutM	Eutrofização Marinha
FMP	Formação de Material Particulado
FOET	Formação de Ozônio (ecossistemas terrestres)
FOSH	Formação de Ozônio (saúde humana)
GEE	Gases de Efeito Estufa
GWP	<i>Global Warming Potential</i> (Potencial de Aquecimento Global)
ICV	Inventário do Ciclo de Vida
IEP	<i>Institute for Economics & Peace</i> (Instituto para Economia e Paz)

IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i> (Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas)
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
MDL	Mecanismo de Desenvolvimento Limpo
NBR	Norma Brasileira
NDC	Contribuição Nacionalmente Determinada
OM	<i>Operating margin</i> (margem operacional)
OMM	Organização Meteorológica Mundial
ONU	Organização das Nações Unidas
PNUMA	Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente
RCE	Redução Certificada de Emissão
RI	Radiação Ionizante
SIN	Sistema Interligado Nacional
THC	Toxicidade humana carcinogênica
THNC	Toxicidade humana não-carcinogênica
UF	Unidade funcional
UOD	<i>upstream-operating-downstream</i>
UR	Unidade de referência
US	Uso do Solo
UNFCCC	<i>United Nations Framework Convention on Climate Change</i> (Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima)
WCED	Comissão Mundial de Meio Ambiente e Desenvolvimento

LISTA DE SÍMBOLOS E UNIDADES

1-4 DCB	1,4-Diclorobenzeno
CFC11	Tricloromonofluormetano
CH ₄	Metano
CO	Monóxido de carbono
CO ₂	Dióxido de carbono
CO ₂ eq	Dióxido de carbono equivalente
Co-60	Cobalto-60
Cu	Cobre
eq	Equivalente
GJ	Gigajoule
HC	Hidrocarbonetos
HFC	Hidrofluorcarbonetos
kBq	Quilobecquerel
kg	Quilograma
m ²	Metros quadrados
m ³	Metros cúbicos
MWh	Megawatt-hora
N	nitrogênio
N ₂ O	Óxido nitroso
NO _x	Óxidos de nitrogênio
O ₃	Ozônio
P	Fósforo
PFCs	Perfluorcarbonos
PM	Material particulado
SF ₆	Hexafluoreto de enxofre
SO ₂	Dióxido de enxofre
SO _x	Óxidos de enxofre
t	Tonelada
yr	<i>Year</i> (ano)

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 - Cálculo de emissões reduzidas.....	54
Equação 2 - Cálculo de emissões do cenário de linha de base.....	54
Equação 3 - Cálculo de emissões do cenário de projeto.....	56

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
1.1	Objetivo geral	21
1.2	Objetivos específicos	21
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
2.1	Mudanças Climáticas e MDL	22
2.1.1	Breve histórico do cenário climático internacional	22
2.1.2	MDL	25
2.2	Avaliação do Ciclo de Vida.....	29
2.2.1	Estrutura Metodológica da ACV e da ACV-O	30
2.2.2	Particularidades da ACV-O	33
2.3	Uso de ACV em conjunto com o MDL.....	36
3	METODOLOGIA.....	41
3.1	Caracterização da organização estudada	42
3.2	Quantificação de emissões do projeto de MDL.....	46
3.3	Quantificação de impactos utilizando a ACV-O	57
3.3.1	Definição de objetivo e escopo	57
3.3.2	Análise de Inventário do Ciclo de Vida	59
3.3.3	Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida.....	61
3.3.4	Interpretação.....	65
3.3.5	Comparação entre os resultados das ACV-Os.....	65
3.4	Comparação da redução de GEE pelo projeto de MDL e pela categoria de impacto Aquecimento Global da ACV-O	66
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	67
4.1	Resultados da ACV-O	69
4.1.1	Vapor	74
4.1.2	Eletricidade	78

4.1.3	Transporte.....	79
4.1.4	Avaliação de <i>trade-offs</i>	83
4.2	Resultados do MDL e da categoria de impacto Aquecimento Global da ACV-O	85
4.3	MDL, ACV e a Crise Climática	86
5	CONCLUSÕES.....	89
6	RECOMENDAÇÃO DE PESQUISAS FUTURAS	91
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	92

1 INTRODUÇÃO

Embora existam inúmeras definições para desenvolvimento sustentável, elas se mantêm semelhantes ao definido pela Comissão Mundial de Meio Ambiente e Desenvolvimento (WCED) no Relatório Brundtland em 1987. Segundo o relatório, o termo se refere ao “desenvolvimento que atenda às necessidades do presente sem comprometer a capacidade das gerações futuras de satisfazer suas próprias necessidades” (WCED, 1987).

Ainda que os impactos da humanidade sobre o planeta Terra já sejam estudados há décadas, a preocupação com a crise climática cresceu à medida que as consequências do aquecimento global se agravaram nos últimos anos, como reportado pelo Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC, 2018). Neste contexto, também cresceu o interesse da população, empresas e governos em atrelar prosperidade econômica ao desenvolvimento sustentável, de modo que a busca por soluções para a crise climática tem ganhado cada vez mais destaque no cenário internacional.

Assim, em 1997, durante a Conferência das Partes (COP), órgão da Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC), foi proposto o Protocolo de Quioto, que, entre outras atribuições, estabeleceu que os países industrializados deveriam reduzir suas emissões de gases de efeito estufa (GEE) em ao menos 5% em relação a 1990. Segundo a Organização das Nações Unidas (ONU, 1997), o Protocolo de Quioto também estabeleceu o procedimento denominado Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) como uma medida para enfrentar o aquecimento global. Esse mecanismo consiste em uma maneira de comercializar emissões, de forma que países industrializados possam financiar projetos de mitigação de GEE que gerem créditos de carbono como contrapartida pelo lançamento de GEE na atmosfera (ONU, 1997). No entanto, o Protocolo de Quioto encontrou muitas barreiras, sobretudo políticas, para surtir efeitos significativos na redução de emissões (CHRISTOFF, 2016), de forma que houve necessidade da criação de um novo tratado, buscando maior aceitação e comprometimento das partes.

Neste contexto, em 2015, foi proposto na França o Acordo de Paris. Esse tratado buscou melhorar algumas das falhas do Protocolo de Quioto com o estabelecimento de metas de redução de GEE para todos os países signatários conforme a realidade de cada um. Além disso, o Acordo de Paris manteve o MDL como possibilidade de compor a estratégia de redução de emissões de GEE a nível global (ONU, 2015), dessa forma, ratificando o intuito de fortalecer o mecanismo.

A premissa do MDL considera que, uma vez que a meta de frear o aquecimento é global, a redução de emissões pode acontecer em qualquer parte do planeta. Assim, países que conseguem reduzir além de suas metas podem comercializar suas reduções de emissões “excedentes” com aqueles que não conseguiram reduzir suas próprias emissões. Para garantir o comércio de emissões, o MDL conta com metodologias certificadas pela UNFCCC para quantificar GEE.

Ao mesmo tempo, outra forma de contabilizar emissões, entre outros aspectos ambientais, é realizar uma Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) de um produto, processo, serviço ou organização, sendo essa última denominada Avaliação do Ciclo de Vida Organizacional (ACV-O), que aplica as mesmas premissas da ACV em companhias ou instituições (ABNT, 2019). A ACV consiste em uma metodologia para compilar e quantificar sistematicamente as entradas, saídas e impactos ambientais potenciais de um sistema de produto ao longo de seu ciclo de vida (ABNT, 2009a; 2009b). A abordagem, os princípios e a estrutura do ciclo de vida podem ser aplicados a uma ampla gama de técnicas e métodos, como avaliação de política ambiental, avaliação de sustentabilidade, gestão da cadeia de suprimentos, avaliação de impacto ambiental, entre outros, podendo apoiar o nível de informação dos tomadores de decisão em diversos setores (ABNT, 2009a; 2009b).

Diante do aumento da preocupação com os impactos ambientais causados por produtos, processos e serviços, a avaliação ambiental tem se mostrado cada vez mais importante (CURRAN, 2013; REAP *et al.*, 2008), aumentando também o interesse em desenvolver métodos para melhor compreender e lidar com esses impactos (ABNT, 2009b). A ACV é uma das técnicas com esse objetivo, e tem se mostrado essencial para o desenvolvimento sustentável uma vez que os caminhos definidos a partir dessa metodologia geralmente são aqueles considerados de menor impacto ambiental ou que sugerem mudanças para reduzir esses impactos (ALVARENGA *et al.*, 2012). Quando diversos aspectos ambientais são avaliados, os impactos vão além das emissões de GEE, e também incluem efluentes para a água e o solo e o consumo de recursos (MARTINEZ-BLANCO *et al.*, 2015). Assim, a ACV pode contribuir para avaliar outros impactos ambientais além do aquecimento global.

Quanto ao MDL, no que se refere exclusivamente aos aspectos ambientais avaliados pela metodologia, é importante garantir que sua implementação não transfira os impactos de emissões de GEE para outras áreas ambientais ou fases do ciclo de vida (*trade-offs*), e isso pode ser analisado por meio de uma ACV, em especial ACV-O. Assim como o MDL, a

ACV-O considera a organização como um todo em um determinado período, considerando todos os seus produtos. A transferência de impactos para outras fases do ciclo de vida poderia tornar o MDL irrelevante ou mesmo prejudicial ao meio ambiente, de forma que a ACV-O pode trazer mais conhecimento acerca do empreendimento avaliado e potenciais impactos ambientais quando aplicada em conjunto com o MDL. Ressalta-se, entretanto, que até o momento a literatura que relaciona MDL e ACV ainda é escassa, o que significa que existe uma lacuna de conhecimento e, portanto, uma oportunidade para estudos nesta área.

Tendo em vista o cenário delineado, com base no aumento das preocupações ambientais e urgência de mitigar emissões diante dos impactos previstos da crise climática, este trabalho avaliou os impactos ambientais potenciais decorrentes da implementação de um projeto de MDL por meio de um estudo de ACV-O. Foram avaliados dois cenários de uma indústria brasileira, sendo um antes e outro após a implementação de um projeto de MDL envolvendo a troca de combustível fóssil (carvão e óleo) por renovável (biomassa residual) em uma caldeira, porém os dados específicos do projeto não serão divulgados para proteger o sigilo industrial. Este trabalho se justifica pelo aumento das preocupações com a crise climática, pela relevância da discussão acerca da possibilidade de mercados de carbono como uma das alternativas para evitar o colapso climático e pela importância de verificar se projetos de MDL podem causar impactos ambientais colaterais.

1.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar a transferência de impactos ambientais de Aquecimento Global¹ para outras áreas após a implantação de um projeto de Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL).

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Calcular os potenciais impactos ambientais de uma organização considerando dois cenários, sendo um antes e outro após a implantação de um projeto de MDL;
2. Comparar os impactos ambientais dos dois cenários analisados e identificar possíveis *trade-offs* entre as categorias de impacto;
3. Comparar a redução de emissões de GEE em um projeto de MDL a partir de dois métodos diferentes: MDL e ACV-O.

¹ Ao longo deste trabalho, adotou-se Aquecimento Global (com iniciais maiúsculas) para se referir à categoria de impacto da ACV, e aquecimento global (com iniciais minúsculas) para se referir ao aumento da temperatura média global devido ao aumento da concentração de GEE na atmosfera.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 MUDANÇAS CLIMÁTICAS E MDL

2.1.1 Breve histórico do cenário climático internacional

Segundo Byer *et al.* (2018), as mudanças climáticas representam um desafio fundamental para a sustentabilidade dos ecossistemas globais e a prosperidade humana no século XXI, pois seus impactos afetam o desenvolvimento, a segurança, a saúde e a equidade entre e dentro dos países. Seus efeitos incluem: diminuição dos estoques de capital natural, prejudicando os esforços para aliviar a pobreza; ameaça à produção de alimentos e ao suprimento de água, desestabilizando as regiões mais afetadas; aumento da temperatura e alteração nos regimes de chuva e regiões costeiras, aumentando a disseminação de doenças; impactos sobre os meios de subsistência principalmente da população de baixa renda nos países em desenvolvimento, diminuindo a capacidade das gerações futuras de atendimento às suas necessidades básicas (BYER *et al.*, 2018), portanto, em desacordo com as premissas do desenvolvimento sustentável. Segundo o Instituto para Economia e Paz (IEP, 2019), estima-se que hoje 971 milhões de pessoas vivam em áreas de alta ou muito alta exposição a choques climáticos.

De acordo com UNFCCC (2000), as mudanças climáticas foram reconhecidas como um problema sério pela Primeira Conferência Mundial do Clima, em 1979. Na sequência, durante as décadas de 80 e 90, foram realizadas diversas conferências intergovernamentais que incluíram governantes, pesquisadores e ambientalistas com foco nas mudanças do clima. Esses encontros abordaram questões científicas e políticas, e contribuíram para o aumento de evidências e levantamento de preocupações internacionais sobre o assunto, solicitando ação global (UNFCCC, 2000).

Em 1988 o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA) e a Organização Meteorológica Mundial (OMM) criaram o Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC) para avaliar o estado do conhecimento existente sobre o sistema climático e respectivas mudanças, incluindo seus impactos ambientais, econômicos e sociais e as possíveis estratégias de resposta (UNFCCC, 2000). O Primeiro Relatório de Avaliação do IPCC, publicado em 1990, forneceu as bases para as negociações da Convenção sobre Mudança do Clima, confirmando as evidências científicas das mudanças climáticas e

permitindo que os governos baseassem suas decisões políticas nas informações mais atualizadas disponíveis (UNFCCC, 2000).

A Convenção-Quadro sobre Mudanças Climáticas da ONU foi assinada por 154 Estados (mais a Comunidade Europeia) no Rio de Janeiro em 1992. A Convenção entrou em vigor em março de 1994, 90 dias após a ratificação da 50ª parte, e a primeira sessão da Conferência das Partes (COP1) foi realizada em Berlim, em 1995 (UNFCCC, 2000).

O Segundo Relatório de Avaliação do IPCC, publicado em 1996, foi escrito e revisado por cerca de 2.000 cientistas e especialistas de todo o mundo. O documento se tornou amplamente conhecido por concluir que as evidências sugerem que há uma influência humana discernível no clima global (UNFCCC, 2000).

Após a formação da Convenção-Quadro sobre Mudanças Climáticas da ONU, os países integrantes continuaram a se reunir em COPs regularmente nos anos que se seguiram, e se reúnem até os dias atuais. Em especial, a COP3 foi realizada em dezembro de 1997 na cidade de Quioto, no Japão. Durante o encontro, foi concebido o Protocolo de Quioto, que, buscando reduzir o impacto humano sobre o clima, estabeleceu a meta de redução em, no mínimo, 5% das emissões de GEE apenas para os países Anexo I (países industrializados) em relação às emissões do ano de 1990 (ONU, 1997). Como apontam Silva e Lopes Júnior (2012), essa diferenciação entre países desenvolvidos e em desenvolvimento se baseia no princípio da “responsabilidade comum, porém diferenciada” do Protocolo, e se refere à industrialização e poluição numa perspectiva histórica. A meta dos países Anexo I deveria ter sido cumprida até 2012.

O Protocolo de Quioto estabeleceu que os GEE que devem ser mitigados são: dióxido de carbono, também conhecido como gás carbônico (CO₂); metano (CH₄); óxido nitroso (N₂O); hidrofluorcarbonetos (HFCs); perfluorcarbonos (PFCs); e hexafluoreto de enxofre (SF₆) (ONU, 1997). Além disso, o documento destaca os principais setores de fontes responsáveis pela emissão de CO₂, entre os quais menciona-se a queima de combustíveis fósseis para gerar energia, indústrias de transformação e de construção, indústria química, diversos processos relacionados à agricultura, entre outros.

Para que o Protocolo entrasse em vigor, era preciso que pelo menos 55 Partes da Convenção o ratificassem, incluindo os países desenvolvidos que contabilizassem pelo menos 55% das emissões totais de CO₂ em 1990 (ONU, 1997). Os Estados Unidos não ratificaram o Protocolo sob o argumento de que era necessário estabelecer metas para os países em desenvolvimento, tendo em mente países como Brasil, China e Índia, que já apresentavam

elevadas emissões na época (GUTIERREZ, 2009). Neste contexto, Gutierrez (2009) aponta que foram necessários vários anos de negociação para que o Protocolo de Quioto entrasse em vigor, o que só ocorreu em novembro de 2004, com a ratificação da Rússia, responsável por aproximadamente 17% das emissões globais de GEE na época.

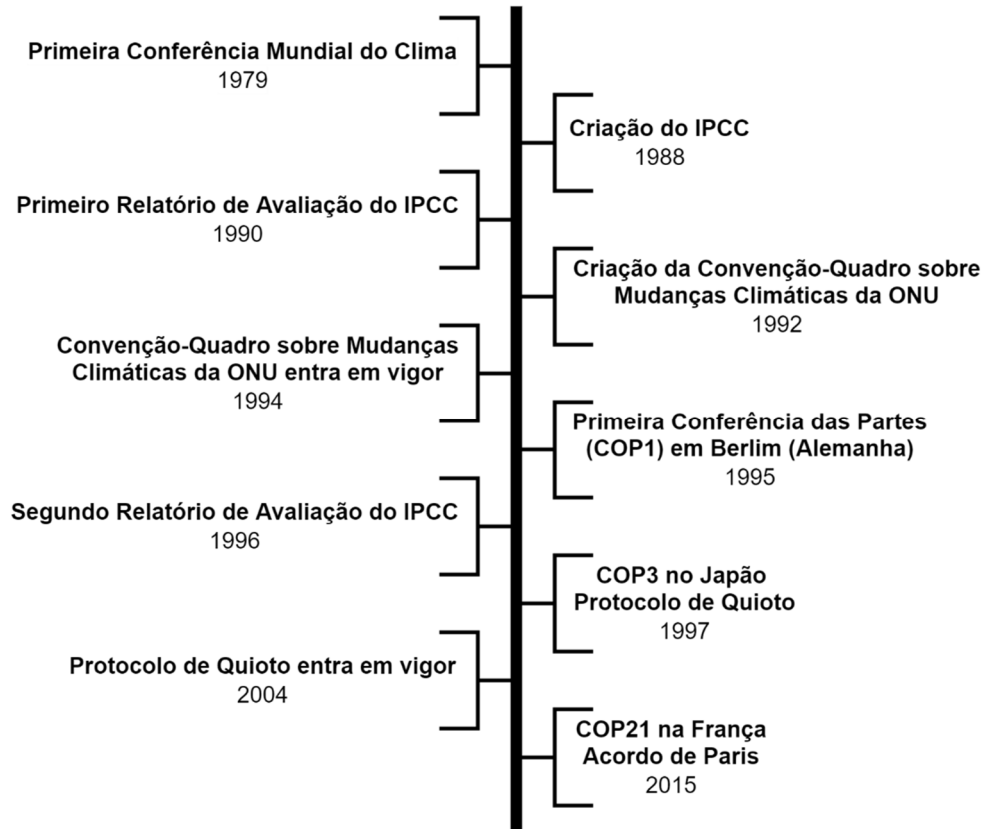
Entre outras deliberações, o Protocolo de Quioto instituiu o MDL, que consiste no comércio regulado de emissões para que países desenvolvidos que não tenham condições de reduzir o lançamento de GEE na atmosfera pudessem compensar parte de suas emissões subsidiando a implantação de projetos em países em desenvolvimento que capturem ou evitem o lançamento de GEE (ONU, 1997). No entanto, o Protocolo de Quioto encontrou diversas barreiras, especialmente políticas (CHRISTOFF, 2016) chegando a ser considerado por alguns como um "tratado simbólico" (BÖHRINGER; VOGTA, 2004), de forma que suas metas não foram alcançadas. Silva e Lopes Júnior (2012) descreveram o cenário: os países que mais emitem GEE não estavam suficientemente comprometidos com o Protocolo de Quioto, e acordos para cumprimento de metas ainda demorariam a ser, de fato, consumados.

Anos depois, em 2015, ocorreu a COP 21 na cidade de Paris, na França, durante a qual foi proposto o Acordo de Paris. Esse documento não apenas reconheceu o aquecimento global, mas também estabeleceu a meta de freá-lo em 2°C com amplo esforço para contê-lo em 1,5°C (ONU, 2015). Para tanto, foi determinado que todos os países signatários devem colaborar para a redução das emissões de GEE, mas que cada um deles tem autonomia para definir sua própria meta de redução de emissões ou aumento de captura de GEE, inclusive os países em desenvolvimento (ONU, 2015). Essa meta é denominada Contribuição Nacionalmente Determinada (NDC), e, para o Brasil é de reduzir em 37% as emissões de GEE até 2025, em relação às emissões de 2005; e reduzir em 43% as emissões de GEE até 2030, também em relação às emissões de 2005 (BRASIL, 2015). O Acordo de Paris manteve o MDL como possibilidade de contribuir para a mitigação das emissões de GEE, podendo o mercado de créditos de carbono ocorrer com abordagem bilateral voluntária entre as partes ou com abordagem centralizada e regulada por um órgão designado pela Conferência das Partes (ONU, 2015).

Por fim, de acordo com o Banco Mundial (2019), a precificação da poluição por carbono é uma ferramenta crucial para direcionar investimentos e ações na direção de uma economia de baixo carbono. Porém, é necessário agir com urgência e elaborar políticas de preço do carbono como parte dos pacotes de políticas climáticas dos países, estabelecendo preços condizentes com o objetivo de alcançar as metas de clima e desenvolvimento

sustentável (BANCO MUNDIAL, 2019). A Figura 1 apresenta uma linha do tempo com os principais marcos históricos da discussão internacional sobre clima no que tange ao escopo deste trabalho.

Figura 1 – Linha do tempo: breve histórico do cenário climático internacional.



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

2.1.2 MDL

O MDL é uma forma de comercializar emissões de GEE, sendo que esse mecanismo especificamente se refere a venda de créditos oriundos de países em desenvolvimento para países industrializados. Em teoria, por meio do MDL, países em desenvolvimento podem ser beneficiados por receberem subsídios para a implantação de projetos que contribuem para o desenvolvimento sustentável local, enquanto países industrializados são beneficiados por conseguirem cumprir parte da meta de redução sem alterações nos processos produtivos dentro do próprio território. Após a implantação e o monitoramento do projeto, é expedida uma Redução Certificada de Emissão (RCE) para cada unidade métrica de carbono reduzida, que poderá ser comercializada no mercado (GUTIERREZ, 2009).

Os créditos são contabilizados levando em consideração o potencial de aquecimento global de cada GEE em relação ao CO₂, o chamado dióxido de carbono equivalente (CO_{2eq}), e cada crédito equivale a 1 t de CO_{2eq} (ONU, 1997). Ressalta-se que, para gerar uma RCE, deve-se satisfazer a condição de adicionalidade estabelecida pelo Protocolo, ou seja, deve ser comprovado que as emissões antropogênicas de GEE são menores do que as que ocorreriam na ausência do projeto e/ou que o sequestro de carbono é maior do que aquele que ocorreria na ausência do projeto (GUTIERREZ, 2009).

O Protocolo de Quioto abriu espaço para a criação de um mercado global de carbono, constituído por diferentes mercados regionais ou nacionais, e diferentes mecanismos de projetos — o MDL é somente um deles. Gutierrez (2009) ressalta que os mercados divergem em vários aspectos, tais como: tamanho; características de concepção; abrangências setoriais e geográficas; e natureza, podendo ser voluntários ou não. A autora acredita que a proliferação de iniciativas de criação de mercados de carbono indica a alta prioridade política dada a esse instrumento em termos de eficiência econômica e por ter potencial de instrumento indutor da inovação tecnológica, ainda que este debate ainda esteja em discussão.

Stern (2007) aponta a importância do MDL como uma forma de cooperação entre países Anexo I e não-Anexo I, bem como para identificar oportunidades de mitigação de GEE. Ainda assim, o MDL tem suas limitações devido aos custos de transação, incerteza das políticas, risco tecnológico, entre outras barreiras, que são vistas como entraves para promover investimentos que contribuem para o desenvolvimento sustentável em setores como infraestrutura em energia e transporte (STERN, 2007). Gutierrez (2009) também aponta obstáculos semelhantes para viabilizar o MDL, com destaque para os elevados custos de transação, que acabam limitando a oferta e demanda de créditos de carbono.

Destaca-se que não há uma metodologia universal para projetos de MDL, ao contrário, embora sua função pareça simples de entender, as metodologias são bastante complexas (UNFCCC, 2019a). De acordo com a UNFCCC (2019a), as metodologias de projetos de MDL são diversas em sua composição e aplicação, objetivando acomodar a ampla gama de atividades e áreas cobertas pelo Mecanismo.

O MDL requer a aplicação de metodologias de linha de base (referente à situação antes de implantar o projeto de MDL) e monitoramento (após a implementação) para determinar a quantidade de RCEs geradas por uma atividade de projeto de mitigação em um país anfitrião. Assim, a UNFCCC disponibiliza um Manual de Metodologias do MDL

(UNFCCC, 2018a) para orientar os interessados e ajudá-los a identificar técnicas adequadas para suas atividades de projeto.

As metodologias são classificadas em cinco categorias de atividades de projeto de MDL: larga escala; pequena escala; reflorestamento em larga escala; reflorestamento em pequena escala; e projeto de captura e armazenamento de carbono (UNFCCC, 2018a). O Manual de Metodologias do MDL (UNFCCC, 2018a) apresenta 216 metodologias de diferentes categorias, tais como: AM0069, sobre a captura de metano em estação de tratamento de águas residuais ou aterro para substituir (total ou parcialmente) o gás natural ou outros combustíveis fósseis como matéria-prima e combustível; ACM0006, sobre geração de eletricidade e calor a partir de biomassa; ACM0022, sobre processos alternativos de tratamento de resíduos, como compostagem em condições aeróbias, digestão anaeróbia com coleta e queima ou uso de biogás, entre outras; AR-ACM0003, sobre reflorestamento de terras (exceto áreas alagadas); etc.

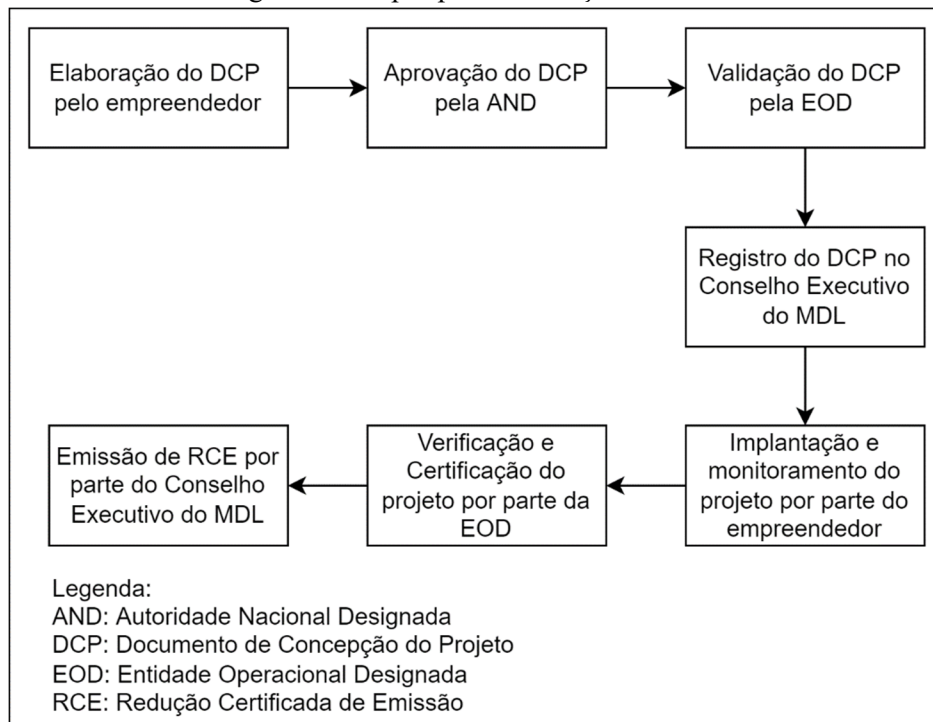
Nesta perspectiva, as possibilidades de projetos que podem gerar créditos de carbono são muitas. Uma vez elaborados, os projetos devem ser verificados e aprovados por um conselho da ONU específico para este fim (ONU, 1997), o Conselho Executivo do MDL (UNFCCC, 2020). No entanto, antes de serem encaminhados para a ONU, os projetos de MDL, denominados Documentos de Concepção de Projeto (DCP), devem ser aprovados por uma Autoridade Nacional Designada (AND) e validados pela Entidade Operacional Designada (EOD).

A aprovação pela AND consiste no aceite do documento, confirmando que o país é signatário do Protocolo de Quioto, que a participação no MDL é voluntária e que o DCP contribui para o desenvolvimento sustentável (UNFCCC, 2020). Segundo o Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações (BRASIL, 2019), a AND no País atualmente é a Coordenação-Geral do Clima, da Secretaria de Políticas para Formação e Ações Estratégicas.

De acordo com a UNFCCC (2020), a etapa de validação consiste na avaliação independente do projeto no que se refere aos requisitos do MDL, e é executada por uma EOD, empresa terceirizada credenciada na ONU para a validação de DCPs. Após a validação, o DCP é registrado no Conselho Executivo do MDL, atrelado à ONU, e, uma vez que o projeto é aceito por esse conselho, o empreendedor é responsável por sua implantação e monitoramento (UNFCCC, 2020). Na sequência, após o prazo de monitoramento estipulado em projeto, a EOD verifica se ocorreram reduções de emissões de acordo com o projeto

aprovado e, em caso positivo, a EOD certifica por escrito que, durante o período especificado, a atividade do projeto alcançou as reduções de emissão estipuladas. A EOD envia então um relatório ao Conselho Executivo do MDL para que este possa, finalmente, emitir a RCE (UNFCCC, 2020). A Figura 2 apresenta as etapas às quais um projeto de MDL é submetido para obtenção de créditos de carbono.

Figura 2 – Etapas para a obtenção de RCE.



Fonte: Elaborado a partir de UNFCCC (2020).

A criação do MDL contribuiu para mudanças no planejamento estratégico das empresas de modo que muitas passaram a realizar levantamento de suas emissões e estabeleceram metas de redução (SILVA; LOPES JÚNIOR, 2012). Os autores apontam que a política ambiental e a implantação de projetos de MDL de algumas empresas tornaram-se parte de uma estratégia bem estruturada em seus planos de negócios.

O MDL foi inicialmente pensado para países — comercializar emissões em escala governamental de acordo com as NDCs de cada nação — mas diversas empresas também começaram a participar da iniciativa e negociar créditos de carbono para adaptarem suas estratégias de redução de emissões, o que ficou conhecido como mercado voluntário de carbono por não estarem diretamente atreladas as NDCs. O mercado voluntário ocorre entre empresas e ainda não é regulamentado no Brasil, mas muitas vezes se utiliza de metodologias internacionalmente aceitas para determinar suas reduções, como as metodologias do MDL.

Assim, ainda há questões tributárias, questões de natureza jurídica, entre outras, que se tornam entraves para o crescimento e consolidação do MDL, o que instiga o campo para novas pesquisas e debates a respeito do tema (SILVA; LOPES JÚNIOR, 2012).

2.2 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA

Diante dos grandes desafios ambientais dos últimos tempos, é necessário buscar alternativas que direcionem a forma de produzir e consumir bens e serviços para um modelo mais sustentável (GUINÉE; HEIJUNGS, 2017). Assim, conhecer os impactos ambientais causados por um produto ou serviço é fundamental para melhorar seu desempenho ambiental. Neste contexto, é desejável quantificar os impactos ambientais relevantes dos sistemas de produtos em todo o seu ciclo de vida, a fim de encontrar soluções para sua melhoria. Um dos métodos de avaliação amplamente utilizados para isso é a ACV (GUINÉE; HEIJUNGS, 2017).

A ACV é uma entre as várias técnicas de gestão ambiental e consiste em uma metodologia que modela o ciclo de vida de um produto ou serviço que desempenha uma ou mais funções definidas (ABNT, 2009a; 2009b). Para a ACV, a propriedade essencial de um sistema de produto é caracterizada pela sua função e não pode ser definida somente em termos dos produtos finais (ABNT, 2009a). Assim, a ACV é estruturada em torno da unidade funcional (UF), que define a finalidade do que está sendo estudado, de modo que todas as análises subsequentes, inclusive entradas e saídas do modelo, sejam relativas àquela UF.

Nos últimos anos, a metodologia da ACV foi adaptada para organizações, permitindo a avaliação, por exemplo, de uma fábrica ou uma franquia em sua totalidade, com seus diversos produtos incluídos — aliás, sua aplicação a esses casos vem se tornando cada vez mais pertinente (ABNT, 2019). Assim, elabora-se uma ACV-O, aplicada a organizações² e caracterizada como uma “compilação e avaliação das entradas, saídas e impactos ambientais potenciais das atividades associadas à organização, como um todo ou parte dela, e a partir disso adotando uma perspectiva de ciclo de vida” (ABNT, 2019). Na ACV-O, a UF é substituída pela unidade de referência (UR), que é a “expressão do desempenho quantificado da organização em estudo a ser utilizada como referência” (ABNT, 2019), ou seja, uma

² “O conceito de organização inclui, mas não é limitado a empreendedor individual, companhia, corporação, firma, empresa, autoridade, parceria, organização de caridade ou instituição ou parte ou combinação destes, seja incorporada ou não, pública ou privada” (ABNT, 2019).

referência mensurável que será o parâmetro ao qual os dados do inventário estarão ajustados, permitindo a cobertura dos diferentes produtos e processos da organização dentro do mesmo estudo de ACV. A UR leva em consideração o portfólio da companhia e a organização em si, assim, enquanto a ACV subsidia a comparação de produtos diferentes com base em sua função, a ACV-O não tem o objetivo de subsidiar a comparação entre organizações diferentes, visto que cada uma é única.

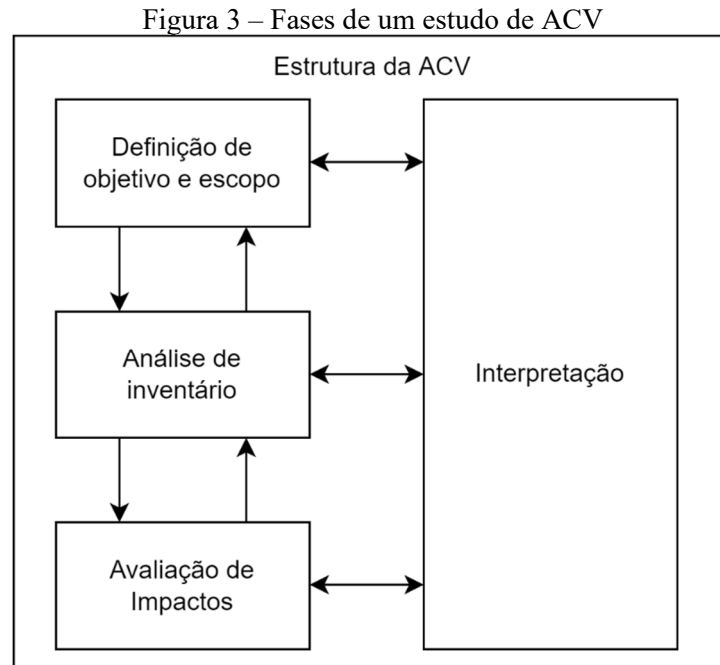
Já no que tange à comparação de cenários, alterações no sistema de produto ou organização podem levar a situações de *trade-offs*, ou seja, compensações ambientais quando há benefício em determinada categoria de impacto ou estágio do ciclo de vida, mas há consequências negativas em outro estágio ou categoria de impacto (BYGGETH; HOCHSCHORNER, 2006), por exemplo, quando há redução de formação de material particulado, mas aumento de eutrofização de água doce. Diversos estudos de ACV indicam que decisões baseadas em um único critério frequentemente deixam de considerar outros impactos não avaliados na tomada de decisão, mas a ACV é uma metodologia capaz de avaliar diversos impactos e a existência de *trade-offs* entre eles (FANTKE; ERNSTOFF, 2018).

Assim, segundo Fantke e Ernstoff (2018) indicar que determinado sistema de produto causa maiores impactos que outro sistema não necessariamente invalida o primeiro, mas indica que o primeiro possui mais desafios no que tange à sustentabilidade, e a ACV ajuda a identificar em qual etapa do processo estão esses desafios. Além disso, é uma técnica robusta para identificar e avaliar compensações entre diferentes impactos ambientais, identificar pontos críticos e minimizar impactos ambientais gerais ao longo dos ciclos de vida de produtos e processos. Por fim, com o crescente interesse na criação de produtos sustentáveis, a ACV é particularmente importante para evitar alegações de sustentabilidade sem suporte técnico (FANTKE; ERNSTOFF, 2018), especialmente no que tange aos *trade-offs*.

2.2.1 Estrutura Metodológica da ACV e da ACV-O

No Brasil, a aplicação da ACV segue a metodologia proposta pelas NBRs ISO 14040 e ISO 14044 (ABNT, 2009a; 2009b). Ainda, no caso de uma ACV-O, também é utilizada a NBR ISO/TS 14072 (ABNT, 2019), que estende a aplicação das demais normas (NBRs ISO 14040 e ISO 14044) a todas as atividades da organização.

Um estudo de ACV é composto por quatro fases: definição de objetivo e escopo; análise de inventário; avaliação de impactos; e interpretação. Estas fases estão apresentadas na Figura 3 e descritas na sequência.



Fonte: Adaptado de ABNT (2009b).

Na primeira etapa, definição de objetivo e escopo, são definidas uma série de premissas que são responsáveis por direcionar todo o estudo. De acordo com ABNT (2009a; 2009b), o objetivo consiste nos motivos para realização do estudo, aplicações desejadas e público-alvo. Por sua vez, o escopo se refere às definições de funções; UF ou UR; fluxo de referência ou fluxo reportado; fronteiras do sistema; fontes e categorias de dados; exigências relativas à qualidade de dados; critérios de inclusão; limites do modelo de estudo; considerações relativas às revisões críticas; entre outros (ABNT, 2009a; 2009b; 2019).

A fase de análise de Inventário do Ciclo de Vida (ICV), segunda fase de uma ACV, consiste no levantamento quantitativo dos fluxos de materiais, energia e resíduos que entram e saem das fronteiras do sistema. Assim, essa etapa abarca coleta de dados; procedimentos de cálculo; análise e validação de dados; e limites da análise do inventário (ABNT, 2009a; 2009b). No caso de uma ACV-O, a etapa de ICV pode ser mais ampla pois pode abarcar diversos produtos da organização, cada um com seu respectivo ciclo de vida (ABNT, 2019).

A terceira fase de uma ACV é a Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida (AICV), que se refere a identificação e mensuração de alterações nas condições ambientais de referência,

sendo utilizada para avaliar a magnitude e significância ambiental dos impactos potenciais de um sistema de produto ao longo do seu ciclo de vida. Segundo Guinée e Heijungs (2017), essa etapa envolve a conversão dos resultados de ICV em unidades comuns e a agregação dos resultados convertidos nas categorias de impacto definidas no escopo.

As categorias de impacto se referem às classes que representam as questões ambientais relevantes às quais os resultados da análise do inventário do ciclo de vida podem ser associados (ABNT, 2009b). Ou seja, elas representam as áreas relacionadas ao meio ambiente impactadas pelo processo ou sistema avaliado na ACV, como Aquecimento Global, Toxicidade Humana, Formação de Material Particulado, Eutrofização de Água Doce, entre outras. Essas categorias se referem à abordagem do tipo *midpoint*, que também podem ser agregadas para formar as categorias conhecidas como *endpoint* para refletir os danos em uma das três áreas de proteção: saúde humana, qualidade do ecossistema e escassez de recursos (HUIJBREGTS *et al.* 2016). As categorias *midpoint* em geral têm menor incerteza por estarem diretamente ligadas aos fluxos ambientais, enquanto a abordagem *endpoint* costuma estar diretamente ligada às áreas de proteção, tornando mais fácil interpretar a relevância dos impactos ambientais (HAUSCHILD; HUIJBREGTS, 2015). Em especial, no caso de uma ACV-O, grande parte dos impactos ambientais podem estar fora da fronteira organizacional dada a complexidade das cadeias de valor (ABNT, 2019).

Embora seja comumente apresentada como a quarta etapa de um estudo de ACV, a fase de interpretação ocorre durante todo o desenvolvimento da modelagem. A ACV é desenvolvida de forma iterativa, assim, durante todo o estudo deve-se interpretar os dados e resultados, podendo, inclusive, acarretar a reavaliação e readequação das premissas iniciais (ABNT, 2009a; 2009b). Também é nessa fase que os dados são sumarizados e discutidos como base para conclusões, recomendações e tomada de decisão de acordo com o objetivo e escopo propostos (ABNT, 2009a).

Segundo a ABNT (2009a), a ACV tem potencial para ser aplicada em organizações públicas e privadas, podendo subsidiar, entre outros fatores, a identificação de oportunidades para a melhoria do desempenho ambiental de produtos em diversos estágios de seus ciclos de vida. Geralmente, um estudo de ACV pode ser usado como parte de um processo decisório muito mais abrangente (ABNT, 2009a; 2009b). Ademais, a comparação dos resultados de diferentes estudos de ACV só é possível se os pressupostos e o contexto de cada estudo forem equivalentes.

Por fim, ressalta-se que a ACV tipicamente não enfoca os aspectos econômicos ou sociais de um produto, mas seus aspectos e impactos ambientais. Aspectos e impactos econômicos e sociais estão, em geral, fora do escopo da ACV, mas outras técnicas podem ser combinadas a ela para avaliações mais abrangentes (ABNT, 2009a), embora hoje a perspectiva do ciclo de vida seja comumente adaptada para avaliar aspectos sociais e econômicos, a exemplo da ACV Social e Custeio do Ciclo de Vida.

2.2.2 Particularidades da ACV-O

Assim como diversas atividades desempenhadas por organizações têm potencial de causar impactos ambientais decorrentes da geração de efluentes, resíduos, entre outros, tais organizações têm papel importante na redução da pressão antrópica sobre o meio ambiente. Dessa forma, a implementação de metodologias que considerem as múltiplas categorias de impacto ambiental, bem como toda a cadeia de valor, é o primeiro passo para melhorar a sustentabilidade de instituições (RIMANO *et al.*, 2019).

A ACV-O é uma dessas metodologias, e pode ser aplicada para organizações públicas ou privadas de todos os portes, independentemente do setor e da localização. Embora relativamente recente — a ISO que deu origem à NBR ISO/TS 14072 (ABNT, 2019) é de 2014 — estudos de aplicação da ACV-O têm crescido nos últimos anos. Rimano *et al.* (2019) apontam que a metodologia identifica e quantifica impactos ambientais dentro e fora dos portões das organizações pois levam em consideração todos os parceiros da cadeia de valor, permitindo identificar pontos críticos ambientais, acompanhar o desempenho ambiental ao longo do tempo e apoiar decisões estratégicas, além de fornecer informações para relatórios de sustentabilidade corporativa.

A ACV-O pode trazer diversos benefícios para a instituição, incluindo, mas não se limitando a, apoio para a tomada de decisão, identificação de *trade-offs* entre cenários, controle e gerenciamento dos processos e da cadeia de valor, aumento da transparência para acionistas e clientes, entre outros (ABNT, 2019).

A maioria das diretrizes das normas ABNT ISO 14040 e 14044 focadas em produtos são aplicáveis a organizações, estendendo a unidade de referência para que seja capaz de abarcar os diferentes produtos da organização (ABNT, 2019). Assim, em termos de aplicação, a ACV-O também segue as etapas metodológicas da ACV apontadas no item 2.2.1. As principais diferenças entre ACV e ACV-O estão na etapa de definição de escopo,

especialmente quanto à unidade de análise, incluindo a UR (que seria equivalente à UF na ACV), e à definição de fronteira do sistema (MARTINEZ-BLANCO *et al.*, 2015). Quanto à essa última, enquanto na ACV seus limites dependem do tipo de produto analisado, na ACV-O a própria organização é a base para estabelecer os limites do sistema (MARTINEZ-BLANCO *et al.*, 2015).

Ademais, a ABNT (2019) aponta que a fronteira do sistema também considera as operações adicionais da organização, podendo ser de: controle operacional, que leva em conta as instalações físicas cujas operações são controladas pela organização; controle financeiro, em que são consideradas as instalações sobre as quais a organização detém controle financeiro; e participação acionária, em que são contabilizadas as instalações de acordo com a participação acionária da organização. Além da complexidade referente à abrangência, parte dos principais impactos calculados na ACV-O podem estar a montante ou jusante da companhia, fora da fronteira organizacional (ABNT, 2019).

As particularidades de cada organização variam muito, mesmo dentro de um mesmo setor, de forma que a ACV-O não tem o objetivo de ser apresentada ao público, mas pode subsidiar comparações internas de uma organização para avaliar seu próprio desempenho ambiental em busca de melhoria contínua. Além disso, na ACV-O o intervalo de tempo dos dados para modelagem é bem delimitado (ABNT, 2019), de preferência com duração de um ano, para subsidiar o acompanhamento do desempenho ambiental da organização, o que nem sempre acontece na ACV, especialmente quando é utilizada a abordagem do berço ao túmulo (MARTINEZ-BLANCO *et al.*, 2015). A Tabela 1, elaborada por Martinez-Blanco *et al.* (2015), apresenta as principais diferenças de escopo entre ACV e ACV-O.

Tabela 1 – Elementos críticos ao definir o escopo de ACV e ACV-O.

	ACV de produto	ACV Organizacional (ACV-O)	
Objeto	Produto é qualquer bem ou serviço (ISO, 2006).	Organização é uma pessoa ou grupo de pessoas que têm suas próprias funções com responsabilidades, autoridades e relacionamentos para atingir seus objetivos. O conceito de organização inclui, mas não está limitado a comerciante individual, empresa, corporação, firma, empresa, autoridade, parceria, instituição de caridade ou instituição, ou parte ou combinação entre elas, sejam incorporadas ou não, públicas ou privadas (ISO, 2014).	
Unidade de análise (descrição)	Unidade funcional é a performance quantificada de um sistema de produto usado como unidade de referência (ISO, 2006).	A unidade de referência é a quantificação da expressão de desempenho da organização em estudo para ser usada como uma referência (ISO, 2014).	Organização relatora é a organização em estudo para ser usada como uma unidade de análise (UNEP/SETAC, 2015).
Unidade de análise (quantificação)	Fluxo de referência é uma medida das saídas dos processos em determinado sistema de produto necessário para cumprir a função expressa pela unidade funcional (ISO, 2006).	O fluxo reportado é a medida das saídas da organização relatora durante o período de referência (UNEP/SETAC, 2015).	
Fronteiras	Limites do sistema são conjuntos de critérios que especificam quais processos unitários são parte de um sistema de produto (ISO, 2006).	Fronteiras do sistema são os limites que definem quais são as operações da organização relatora e o uso de recursos e as emissões associadas a elas incluídas no estudo (UNEP/SETAC, 2015).	

Fonte: Martinez-Blanco *et al.* (2015), traduzido pela autora (2021).

2.3 USO DE ACV EM CONJUNTO COM O MDL

No que tange à elaboração de estudos de ACV em paralelo com projetos de MDL, foi realizada uma revisão de artigos que abordam MDL e ACV simultaneamente, no entanto, a falta de publicações na área evidenciou a escassez de trabalhos que abordam ambas as metodologias em conjunto. A pesquisa contemplou quatro bases de dados distintas (*Scopus*, *Compendex*, *Abstracts in New Technology and Engineering - ANTE* e *Web of Science*) e buscou trabalhos com os termos “Avaliação do Ciclo de Vida” e “Mecanismo de Desenvolvimento Limpo”, além de suas respectivas siglas, em português, inglês e espanhol. Após a exclusão de duplicatas e de trabalhos que evidentemente estavam fora do escopo almejado, 30 artigos foram contemplados.

Na sequência, procedeu-se à leitura dos resumos dos trabalhos para verificar quais abordam os temas MDL e ACV de forma conjunta. Com base nessas leituras, a escolha dos trabalhos mais relevantes se deu de forma qualitativa. Buscaram-se pesquisas que haviam realizado um projeto de MDL e um estudo de ACV para um mesmo empreendimento ou que buscassem complementariedade entre as metodologias. Assim, por exemplo, o trabalho de Kadam (2002) bem como o de Stichnothe e Schuchardt (2010) realizaram ACV, mas o MDL foi mencionado apenas como possibilidade, sem maior aprofundamento, sendo, portanto, desconsiderados. Da mesma forma, Bogner *et al.* (2008) realizaram um trabalho que abordou estratégias, custos e potenciais para mitigação de GEE de resíduos, incluindo MDL, porém não realizaram ACV, limitando-se a recomendar essa metodologia para, junto com outras técnicas, reduzir incertezas atuais acerca das emissões e potenciais de mitigação, bem como para a consideração dos impactos diretos e indiretos das tecnologias e políticas de gestão de resíduos. Assim, esse trabalho tampouco foi avaliado na íntegra.

Por outro lado, Chuen e Yusoff (2012) realizaram ACV e MDL para uma mesma indústria, enquanto Gentil *et al.* (2009) analisaram e compararam quatro formas de contabilizar GEE de resíduos sólidos, incluindo ACV e MDL, e, portanto, esses trabalhos foram considerados relevantes nesta pesquisa. Assim, foram selecionados cinco trabalhos para leitura na íntegra e, na sequência, são apresentados os principais pontos de cada um. São eles: Kumarappan e Joshi (2011), Matsushashi *et al.* (2002), De Schepper *et al.* (2015), Gentil *et al.* (2009) e Chuen e Yusoff (2012).

Kumarappan e Joshi (2011) realizaram um estudo relacionado ao uso de biocombustível em transportes nos Estados Unidos (EUA). Os autores analisaram os

principais desafios no desenvolvimento de estruturas de comércio de carbono do setor no país e delinear uma proposta de mercado de carbono para os biocombustíveis. A proposta incluiu ACV dos benefícios do uso de combustíveis mais limpos no que se refere a GEE, uma combinação de medidas de desempenho padrão e específicas de projetos e a atribuição de direitos de propriedade de comércio de GEE a produtores de biocombustíveis.

Os EUA não ratificaram o Protocolo de Quioto, não tendo assumido compromisso internacional de redução de emissões. Ainda assim, os autores acreditavam que, no futuro, os mercados de carbono seriam globais, então era importante propor um modelo que se integrasse o MDL. Além disso, quantidades significativas de emissões de GEE de fontes fósseis ocorrem durante as várias etapas do ciclo de vida dos biocombustíveis, de forma que é necessário quantificar as emissões de GEE usando uma abordagem de ciclo de vida para comparar gasolina e biocombustíveis (KUMARAPPAN; JOSHI, 2011).

A realização de ACVs específicas de cada projeto para quantificar os benefícios de GEE pode ser complicada, sendo necessárias algumas simplificações. Assim, Kumarappan e Joshi (2011) propõem que uma combinação de padrões de desempenho específicos do projeto e do setor seja usada em projetos de biocombustíveis. Mais especificamente, a proposta inclui o uso de médias da região para o uso de matéria-prima; dados específicos de projeto para quantificar emissões durante a produção de biocombustível, mistura e transporte; e uso de padrões de desempenho médios e mix de frotas de veículos para estimar as emissões. Os autores recomendam o uso de dados específicos dos projetos para a produção de biocombustíveis e os estágios de transporte e distribuição.

Kumarappan e Joshi (2011) ainda ressaltam que o uso de biocombustíveis afeta outras emissões de gases além dos GEE, como monóxido de carbono (CO), óxidos nítricos (NO_x), compostos orgânicos voláteis (COV) e materiais particulados (PM₁₀ e PM_{2.5}), que afetam a saúde e o meio ambiente e podem ser avaliados fora do escopo dos mercados de carbono. Um estudo de ACV pode contribuir para esse tipo de avaliação.

Matsubishi *et al.* (2002) avaliaram um projeto de MDL utilizando sistemas fotovoltaicos. Primeiramente, os autores estimaram as emissões de CO₂ do ciclo de vida de sistemas fotovoltaicos e de outras tecnologias de geração de energia a partir de combustíveis fósseis. Os resultados indicaram que o CO₂ do ciclo de vida dos sistemas fotovoltaicos é muito menor que o das gerações de energia movidas a combustíveis fósseis. Em seguida, os autores investigaram aspectos econômicos do MDL, juntamente com estratégias domésticas de disseminação para sistemas fotovoltaicos. Além disso, assim como Kumarappan e Joshi

(2011), Matsushashi *et al.* (2002) ressaltam que os projetos de redução de emissões do MDL podem trazer outros benefícios além dos créditos derivados da redução de CO₂, como a mitigação da poluição do ar, que pode até melhorar a aceitabilidade de projetos de MDL.

De Schepper *et al.* (2015) também realizaram um estudo envolvendo projetos solares. Os autores apontam que, apesar de contribuírem para o desenvolvimento sustentável, os projetos solares desempenhavam, na época do trabalho, um papel insignificante no âmbito do MDL. Neste contexto, foi avaliado o desempenho econômico e ambiental do ponto de vista da mitigação de GEE de projetos solares fotovoltaicos de pequena escala em zonas rurais.

Em particular, De Schepper *et al.* (2015) compararam o uso de custos absolutos e relativos de mitigação para avaliar a atratividade desses projetos no âmbito do MDL. Também foi calculada a redução de emissões desses projetos por meio de ACV utilizando o banco de dados Ecoinvent®. Os autores complementaram a análise de custos de mitigação de GEE com uma abordagem de otimização multiobjetivo na qual os objetivos econômicos e ambientais são otimizados simultaneamente, ressaltando, no entanto, que não existe uma solução única que otimize todos os objetivos ao mesmo tempo.

Quanto à temática de resíduos sólidos, Gentil *et al.* (2009) apontam que a quantificação de GEE é um dos principais focos na gestão de resíduos. Em seu artigo, os autores analisam quatro formas de contabilizar esses gases na gestão de resíduos, a saber: a nível nacional de acordo com o Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC); a nível corporativo, como parte do relatório anual sobre questões ambientais e responsabilidade social; ACV, como base ambiental para avaliar sistemas e tecnologias de gerenciamento de resíduos; e MDL. Esses tipos de contabilidade estão bem estabelecidos, porém, por natureza, cada um tem seu próprio escopo e métodos, gerando resultados diferentes. O MDL, por exemplo, estima os GEE estabelecidos pelo Protocolo de Quioto, enquanto a ACV tem potencial para incluir todas as emissões conhecidas (GENTIL *et al.*, 2009).

No que se refere às emissões relacionadas a resíduos sólidos, é importante indicar o tipo e a composição dos resíduos no nível da instalação, os GEE contabilizados, o potencial de aquecimento global (GWP) atribuído à cada GEE, as fronteiras com outros setores, entre outras especificações. Gentil *et al.* (2009) ressaltam a importância da consistência dos dados utilizados, inclusive fatores de emissão, GWP, entre outros.

Os autores propõem então uma estrutura *upstream-operating-downstream* (UOD) para contabilizar dados básicos referentes a tecnologias relacionadas a questões de GEE,

incluindo uma distinção clara entre emissões diretas de tecnologias de gerenciamento de resíduos, atividades indiretas a montante (uso de energia e materiais) e atividades indiretas a jusante (produção de energia, entrega de materiais secundários). A UOD visa aumentar o nível de transparência, precisão e robustez nos relatórios de dados do nível operacional na gestão de resíduos. Essa estrutura não compromete os mecanismos de relatório e contabilidade existentes, mas visa consolidá-los, garantindo uma base transparente e rastreabilidade para os dados de tecnologia (GENTIL *et al.*, 2009).

Finalmente, Chuen e Yusoff (2012) estudaram os benefícios da implementação do MDL para o desenvolvimento sustentável usando a perspectiva da ACV a partir de um estudo de caso da indústria de óleo de palma na Malásia. Esse foi o único trabalho encontrado que realizou ACV de um mesmo empreendimento antes e após o MDL. Segundo os autores, como o MDL se concentra apenas na redução de emissões de GEE, a ACV pode ser usada para fornecer uma avaliação adicional do impacto ambiental da implementação do MDL. Portanto, a ACV poderia ser usada para avaliar os impactos ambientais associados à obtenção de Reduções Certificadas de Emissões (RCE), complementando, assim, a avaliação do MDL.

Os autores ainda utilizaram o indicador de redução de emissão de GEE obtido pela metodologia do MDL para estimar os impactos ambientais com base em várias consequências e avaliações ambientais, classificadas por categorias de impacto, tais como efeito carcinogênico, mudanças climáticas, camada de ozônio, depleção de combustíveis fósseis, entre outros. Como resultado, Chuen e Yusoff (2012) verificaram que a implantação de um projeto de MDL na indústria de óleo de palma estudada contribui para melhorar o tratamento de suas águas residuais e é importante para reduzir o impacto ambiental total gerado pelo óleo de palma na indústria.

Adicionalmente, os autores mencionaram que os óleos vegetais surgiram como um substituto potencial para o esgotamento de combustíveis fósseis no mercado, especialmente com seu potencial como biodiesel. Além disso, Chuen e Yusoff (2012) apontam que as RCEs do MDL fornecem um incentivo adicional para essa indústria investir em novas tecnologias de tratamento de óleo de palma, incorporando um sistema de reutilização de biogás. Assim, de acordo com os autores, o MDL trouxe uma nova perspectiva para a indústria de óleo de palma na mitigação de emissões de GEE e aumentou a sustentabilidade de seus produtos.

Nos últimos anos, cresceu o número de estudos acerca do desenvolvimento de métodos de avaliação de impacto das mudanças climáticas. O AR5 (5º Relatório de Avaliação) do IPCC (2014), agrega estudos sobre as mudanças do clima que incluem a

identificação de mecanismos físicos, as mudanças observadas e os potenciais impactos futuros. Dong *et al.* (2019) apontam que esse relatório é usado como base para o desenvolvimento de metodologias de AICV sobre a categoria de impacto referente às mudanças climáticas. A ACV comumente usa os fatores do IPCC para avaliar a quantidade de GEE emitida ao longo do ciclo de vida de um serviço ou sistema de produto, o que também é conhecido como pegada de carbono e tem sido amplamente estudado na literatura (NIJDAM *et al.*, 2012; STOESSEL *et al.*, 2012).

Neste contexto, Dong *et al.* (2019) afirmam que a caracterização de GEE de acordo com seus potenciais de contribuição para o aquecimento global normalmente considera fatores de emissão desenvolvidos pelo IPCC, sendo que países individuais também desenvolvem seus próprios fatores, os quais são utilizados com certa frequência. Além disso, a ACV tem sido usada nos últimos anos para avaliar as emissões de GEE específicas de projetos (DONG *et al.*, 2019).

Por fim, Byer *et al.* (2018) afirmam que a avaliação de impacto tem muito a contribuir na formulação de medidas de mitigação e adaptação às mudanças climáticas. Suas ferramentas e metodologias podem auxiliar a redução de emissões de GEE, a redução e o gerenciamento de efeitos adversos, e, ainda, podem contribuir para aumentar potenciais benefícios para as políticas, programas, planos e projetos propostos. Conforme a NBR ISO 14040 (ABNT, 2009), a abordagem, os princípios e o pensamento de ciclo de vida podem ser aplicados à uma ampla gama de técnicas e métodos, inclusive à avaliação de impacto ambiental. Neste contexto, a avaliação de impacto pode auxiliar governos a cumprirem seus compromissos internacionais, tais como as NDCs, e para ajudar a indústria e o público a entenderem as consequências ambientais e sociais das mudanças climáticas (BYER *et al.*, 2018).

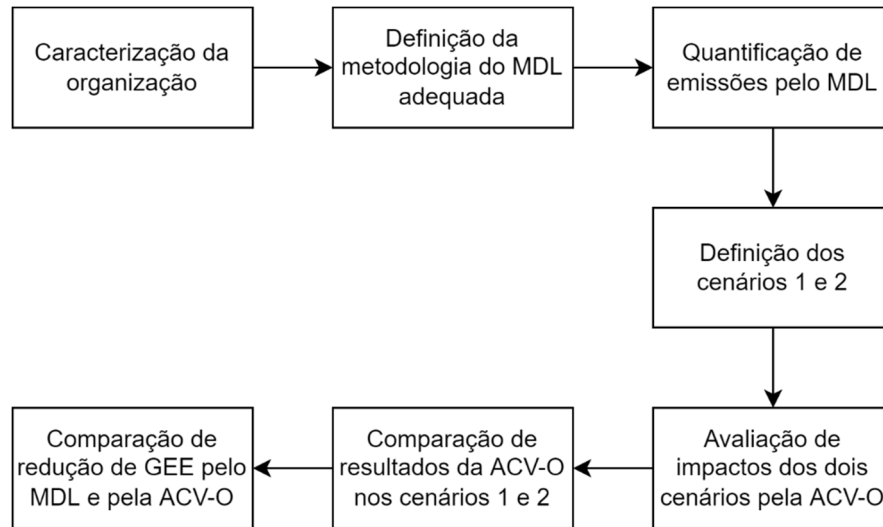
3 METODOLOGIA

Visando atender os objetivos deste trabalho, a metodologia foi composta por quatro etapas, a saber:

1. Caracterização da organização estudada;
2. Quantificação de emissões de GEE por meio de um projeto de MDL;
3. Quantificação dos impactos antes e depois da implementação do projeto de MDL utilizando a ACV-O e comparação entre os resultados; e,
4. Comparação da redução de emissões pelo projeto de MDL e pela categoria de impacto Aquecimento Global da ACV-O.

Uma vez que existem mais de 200 metodologias de MDL validadas pela UNFCCC, a etapa 1 é fundamental para definir a metodologia do MDL adequada. Além disso a caracterização da organização é uma etapa básica para realizar a ACV-O. Após a caracterização, foi escolhido o método mais adequado da UNFCCC para quantificar as emissões de GEE via MDL (etapa 2). Com base nisso, dois cenários foram definidos para ACV-O, sendo um antes e outro após a implementação de um projeto de MDL na indústria analisada. Na sequência, foi realizada uma ACV-O para cada um dos cenários e os resultados da modelagem foram comparados entre si (etapa 3). Finalmente, a redução das emissões de GEE por meio do MDL foi comparada com a redução da categoria Aquecimento Global da ACV-O (etapa 4) entre os dois cenários. A Figura 4 apresenta as fases metodológicas desta pesquisa, as quais são exploradas em maiores detalhes a seguir.

Figura 4 – Etapas metodológicas deste trabalho.



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

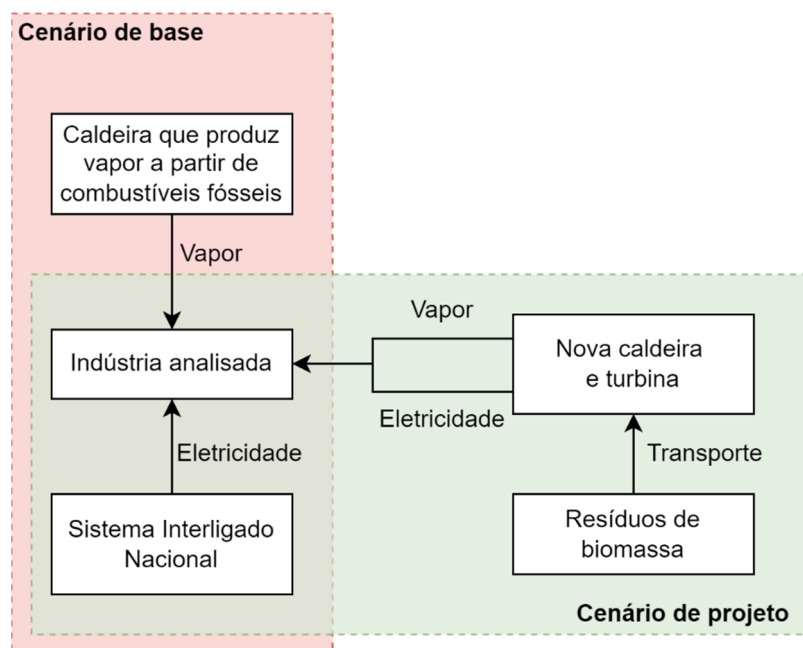
3.1 CARACTERIZAÇÃO DA ORGANIZAÇÃO ESTUDADA

Para analisar a organização, fez-se necessário, em primeiro lugar, caracterizá-la. Essa caracterização permitiu definir a metodologia adequada do MDL e as considerações necessárias para a realização da ACV-O e de todas as etapas metodológicas subsequentes.

Foram utilizados dados primários de uma indústria localizada no Brasil que utiliza grande quantidade de vapor em seu processo produtivo. As informações referentes à empresa e as especificidades dos processos, matérias-primas e produtos foram mantidas em sigilo. A caracterização da indústria foi realizada por meio de visitas técnicas à fábrica e coleta de dados primários utilizando um modelo personalizado em planilha Excel, que foi enviado por e-mail. A planilha foi respondida por um funcionário da indústria analisada e incluiu a descrição de informações qualitativas com relação ao tipo de tecnologia e representatividade dos dados, bem como informações quantitativas sobre materiais, consumo de energia e produtos. As saídas referentes a efluentes, resíduos sólidos e emissões atmosféricas foram obtidas a partir de laudos e planilhas de monitoramento fornecidas pela empresa. Com base nessas informações, dois cenários foram definidos, sendo que o cenário 1 foi elaborado a partir de dados primários do funcionamento da indústria e o cenário 2 foi elaborado a partir do cenário 1 adaptado com base na metodologia do MDL utilizada, que será descrita no tópico 3.2. Assim, os cenários definidos para o modelo são apresentados a seguir e representados na Figura 5:

1. Cenário 1: toda a energia térmica utilizada na indústria é proveniente da queima de carvão e óleo, ambos combustíveis fósseis. A energia elétrica é proveniente do Sistema Interligado Nacional (SIN) da matriz elétrica brasileira.
2. Cenário 2: uma nova caldeira a vapor que opera a partir da queima de biomassa residual será construída. Toda a energia térmica e 66% da energia elétrica consumidas na indústria serão provenientes da queima de biomassa residual.

Figura 5 – Representação do cenário de linha de base (cenário 1) e do cenário de projeto (cenário 2).



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

O cenário 1, que caracteriza a condição atual da indústria, utiliza energia térmica obtida por meio da queima de carvão mineral e óleo, ambos combustíveis fósseis. O cenário 2, por sua vez, caracteriza a condição futura da empresa, após a implantação de um projeto de MDL que consistirá em uma caldeira de geração de energia elétrica e vapor por queima de biomassa residual, composta por resíduos de agricultura e silvicultura em um raio de até 200 km da planta industrial analisada. Uma vez implantado esse projeto, a indústria gerará toda a energia térmica e 66% da energia elétrica necessária às suas atividades.

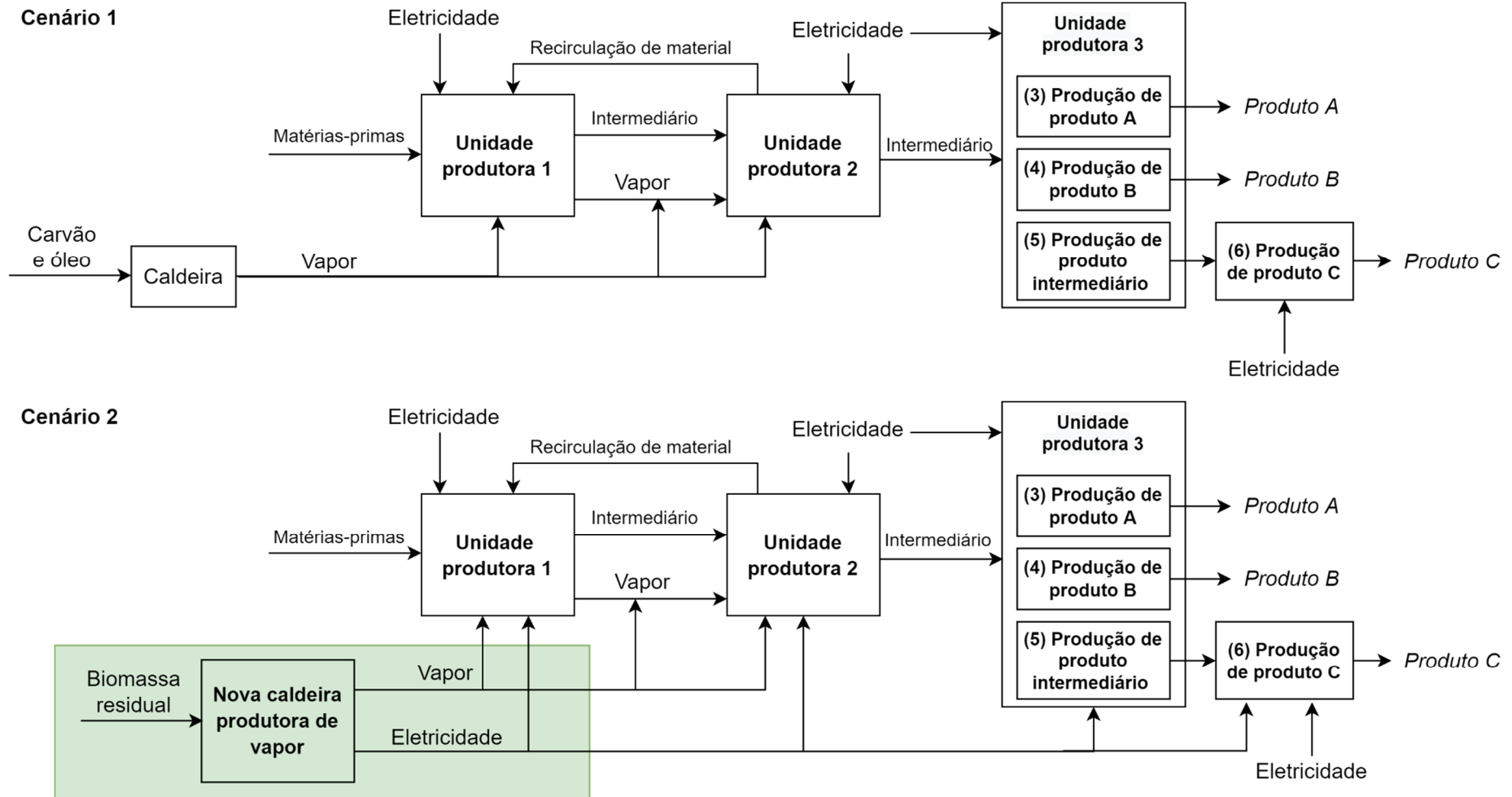
Previamente à implantação do projeto, a eletricidade era totalmente obtida junto ao SIN. Em paralelo a isso, em regiões próximas à indústria analisada, grandes quantidades de resíduos de biomassa de agricultura e silvicultura eram geradas e descartadas diretamente na

natureza, representando uma fonte de potenciais impactos ambientais. Caso a atividade de projeto não fosse implementada, as operações industriais da empresa continuariam a acontecer da mesma maneira que ocorrem no cenário 1. Como parte do escopo da metodologia do MDL utilizada e com base em visitas técnicas às áreas de descarte de biomassa, as emissões da degradação da biomassa no cenário de linha de base foram desconsideradas, não tendo sido calculada a possibilidade de degradação anaeróbica com emissões de CH₄.

No cenário 2, a demanda da nova caldeira por biomassa será 100% atendida por resíduos, cuja composição conterà fragmentos de pinus e eucalipto, serragem e casca de arroz, e nenhum deles passará por processamento além de corte mecânico antes de sua combustão. O projeto de MDL considerou que, na ausência do projeto, esses resíduos seriam despejados na natureza ou aterrados, decompondo-se e liberando substâncias, inclusive GEE. Sendo assim, embora a queima dos resíduos de biomassa gere emissões atmosféricas, considerou-se que essas emissões foram somente aceleradas e transferidas, não tendo sido atribuída à indústria analisada. Caso as emissões da degradação da biomassa no cenário de linha de base tivessem sido consideradas e comprovada a decomposição anaeróbica da biomassa residual, é possível que as emissões do cenário 1 fossem maiores que o estimado por este trabalho, podendo interferir na diferença de emissões entre os cenários 1 e 2. O transporte dos resíduos de biomassa até a nova caldeira se dará por caminhões abastecidos com óleo diesel, e as emissões relativas a esse transporte foram contabilizadas tanto na ACV quando no MDL.

A Figura 6 apresenta o processo produtivo da indústria analisada no cenário 1 e no cenário 2.

Figura 6 – Processo produtivo dos cenários 1 e 2 com destaque para a diferença entre eles.



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Embora o objetivo deste trabalho esteja focado no MDL e este, por sua vez, se refira à troca de combustível na caldeira, esta alteração tem implicações em todas as etapas do processo produtivo uma vez que altera as entradas de eletricidade em toda a indústria. Portanto, a análise foi feita em função de toda a indústria ao invés de focar apenas na caldeira. Ademais, é importante ressaltar que toda a análise está em função da produção total da indústria, em massa, durante o período de um ano. Assim, a nova caldeira não recebe a mesma quantidade em massa de biomassa residual que recebia de carvão e óleo, e sim a quantidade de biomassa necessária para produzir a quantidade de vapor necessária para obter a mesma quantidade de produtos no cenário 2 que era produzida no cenário 1.

3.2 QUANTIFICAÇÃO DE EMISSÕES DO PROJETO DE MDL

A UNFCCC determinou uma série de metodologias para a elaboração de projetos de MDL de acordo com a natureza da atividade que gerará os créditos de carbono. Para este trabalho, foi utilizada a Metodologia Consolidada para Geração de Eletricidade e Calor a partir de Biomassa, código ACM0006 da UNFCCC (2018b). Essa metodologia é aplicável às atividades de projeto que operam usinas termelétricas, incluindo usinas de cogeração usando biomassa. As atividades típicas são novas instalações, expansão da capacidade, melhorias na eficiência energética ou projetos de troca de combustível, que é o caso a ser avaliado neste trabalho.

De acordo com UNFCCC (2018a), esse tipo de projeto engloba o uso de biomassa para geração de energia e calor em vez de combustível fóssil ou aumento da eficiência de usinas de energia e calor movidas a biomassa. Considerando a necessidade de combustão para a geração de vapor, a utilização de biomassa renovável traz vantagens ambientais em relação à utilização de insumos de origem fóssil.

Para o projeto de MDL aqui avaliado, isto é, um projeto de redução de emissões com substituição de uma caldeira para geração de vapor a partir de biomassa ao invés de carvão e óleo, existem dois cenários: o cenário da linha de base, representado pelo cenário 1 já mencionado; e o cenário de projeto, representado pelo cenário 2. O cenário da linha de base representa as emissões de GEE em um determinado ano y considerando as atividades atuais, ou seja, se a indústria mantiver seus processos da forma como operam atualmente. Por sua vez, o cenário de projeto representa a possível situação futura da indústria, após a implementação de mudanças no sistema de produção para reduzir as emissões.

As metodologias propostas pela UNFCCC utilizam diversas ferramentas para sua aplicação, e, na sequência, serão apresentadas as ferramentas da metodologia ACM0006. Ademais, para a aplicação da metodologia foi utilizado o *software* Excel para cálculos e, sempre que necessário, foram realizados procedimentos de conversão de unidades para adequar os dados disponíveis às exigências metodológicas.

Primeiramente, foi identificado o cenário de linha de base, ou seja, aquele em que não há implantação do projeto de MDL e que, no âmbito deste trabalho, corresponde ao cenário 1. Para tanto, foi utilizada a TOOL02 (UNFCCC, 2017a). Também é nessa fase inicial que deve ser demonstrada a adicionalidade do projeto de MDL, comprovando que ele é importante para garantir a redução das emissões de GEE por meio da TOOL23 (UNFCCC, 2015b). A garantia de adicionalidade é fundamental para transformar as reduções de CO_{2eq} em créditos de carbono, pois projetos que não são considerados adicionais não podem gerar créditos de carbono ainda que as emissões sejam reduzidas, e, portanto, não podem ser comercializados. Entretanto, este trabalho tem foco na quantificação de emissões, e não nos mecanismos de mercado, de forma que os resultados serão tratados como redução de emissões, e não como créditos. Ainda no que tange à TOOL23, apoiada pelo ANNEX13 (UNFCCC, 2009a), pela TOOL27 (UNFCCC, 2019b) e pela TOOL24 (UNFCCC, 2015c), foram avaliados cenários alternativos possíveis que forneçam a mesma saída (serviço ou produto) da atividade de projeto do MDL proposta e que sejam condizentes com as leis do país.

Para calcular as emissões anuais de CO₂ de combustíveis fósseis do projeto, foi utilizada a TOOL03 (UNFCCC, 2017b). O cálculo é feito com base na quantidade de combustível queimada anualmente e no coeficiente de emissão de CO₂ do tipo de combustível utilizado. O cálculo desse coeficiente, também explicitado na ferramenta TOOL03, pode ser feito com base na composição química ou no poder calorífico do combustível.

A TOOL04 (UNFCCC, 2017c), por sua vez, foi utilizada para calcular emissões geradas a partir do descarte de resíduos em locais de disposição de resíduos sólidos durante um período de 12 meses ou de um mês específico. Como aproximação, a geração de metano nesses locais é descrita como uma função do tempo, de acordo com um processo de decaimento de primeira ordem, com frações orgânicas de degradação rápida, moderada e lenta, distinguidas entre si.

Já a TOOL05 (UNFCCC, 2017d) foi aplicada para estimar as emissões da linha de base, do projeto ou fugitivas associadas ao consumo de eletricidade. Essa ferramenta fornece

os cálculos necessários para estimar os parâmetros que se seguem para determinado ano: emissões do projeto a partir do consumo de eletricidade; emissões de linha de base do consumo de eletricidade; emissões fugitivas do consumo de eletricidade; quantidade de eletricidade gerada e fornecida pela usina do projeto à rede; e, quantidade de eletricidade gerada e fornecida pela usina do projeto aos consumidores ou à determinada usina. Ademais, a TOOL05 também fornece procedimentos de monitoramento da quantidade de eletricidade gerada pela usina do projeto.

A TOOL07 (UNFCCC, 2018c) foi usada para determinar o fator de emissão de CO₂ para o deslocamento de eletricidade gerada pelas usinas de energia em um sistema elétrico, denominado fator de emissão de margem combinada (CM). O CM é o resultado da média ponderada de dois fatores de emissão pertencentes ao sistema elétrico: o de margem operacional (OM) e o de margem de construção (BM). O fator de emissão OM se refere ao grupo de usinas existentes cuja geração atual de eletricidade seria afetada pela atividade de projeto de MDL proposta, enquanto o fator de emissão BM se refere ao grupo de usinas em potencial cuja construção e operação futura seriam afetadas pela atividade de projeto do MDL proposta. A execução da TOOL07 é composta por seis etapas, a saber: identificar os sistemas elétricos relevantes; definir se deseja incluir usinas fora da rede no sistema elétrico do projeto (opcional); selecionar um método para determinar a margem operacional (OM); calcular o fator de emissão da margem operacional de acordo com o método selecionado; calcular o fator de emissão da margem de construção (BM); e calcular o fator de emissão da margem combinada (CM).

Para estimar a eficiência das unidades de energia térmica e de geração de energia elétrica, utilizou-se a TOOL09 (UNFCCC, 2015a). Essa ferramenta descreve vários procedimentos para determinar a eficiência de um sistema de geração objetivando estimar as emissões da linha de base. Os parâmetros calculados a partir dessa ferramenta são a eficiência do sistema de geração de energia como valor constante e a função de eficiência de carga, que expressa a eficiência do sistema de geração de energia em função da carga na qual o sistema é operado. A ferramenta pode ser usada no caso de atividades do projeto que melhorem a eficiência energética de um sistema existente por meio de modernizações ou substituição do sistema existente por um novo sistema.

Por sua vez, a TOOL10 (UNFCCC, 2009b) forneceu orientação para determinar a vida útil restante dos equipamentos do cenário de linha de base ou de projeto. Para sua aplicação, deve ser claramente especificado para quais equipamentos a vida útil restante deve

ser determinada, o que deve ocorrer antes da implementação da atividade do projeto. Sob esta ferramenta, não são considerados impactos no tempo de vida do equipamento devido a políticas e regulamentos, como novas normas ambientais, ou alterações nos serviços necessários, como aumento da demanda energética.

A TOOL11 (UNFCCC, 2012a) se refere à avaliação da validade da linha de base atual e atualização da linha de base na renovação do período de obtenção de créditos. Essa ferramenta deve ser utilizada quando o empreendedor quiser renovar seus créditos de carbono. Para tanto, a ferramenta fornece uma abordagem para avaliar se a linha de base atual ainda é válida para o próximo período de crédito. Caso não seja, a mesma ferramenta fornece uma abordagem para atualizar a linha de base de forma a poder renovar os créditos. Essa ferramenta não foi necessária para a execução do trabalho pois não foi contemplada a renovação de créditos.

Já a TOOL12 (UNFCCC, 2012b) foi utilizada para estimar as emissões de CO₂ do transporte de carga por veículos, sendo aplicável às atividades do projeto que envolvem transporte rodoviário de carga, mas que o transporte não é a principal atividade do projeto e tampouco a principal fonte de emissão de gases de efeito estufa. Essa condição garante que as emissões relacionadas ao transporte sejam pequenas em relação às reduções totais de emissão esperadas e, por esse motivo, permite usar uma abordagem simplificada para estimar as emissões do transporte de carga. Os cálculos das emissões do transporte em determinado período envolvem dados referentes à distância entre origem e destino, massa total transportada, fator de emissão e atividades de transporte de carga realizadas na atividade de projeto. No caso analisado, as emissões de transporte do cenário de projeto se referem ao deslocamento de biomassa por caminhões para a nova caldeira.

Por fim, a TOOL16 (UNFCCC, 2017e) permite calcular as emissões da atividade de projeto ou emissões fugitivas referentes à biomassa usada como combustível ou matéria-prima. A biomassa pode ser proveniente de outros processos (biomassa residual, como foi o caso deste trabalho) ou de cultivo em uma plantação dedicada (floresta plantada com o objetivo de fornecer biomassa para as caldeiras de uma indústria).

Ressalta-se que, em muitas das ferramentas mencionadas, também há opção de valores padrão que podem ser utilizados em casos de ausência de dados, como vida útil de equipamentos, eficiência das unidades produtoras de energia e consumo de combustíveis. Porém, em geral, esses valores padronizados são conservadores, de modo que é mais interessante que empreendedores que têm dados para realizar os cálculos o façam.

As 14 ferramentas necessárias para executar a ACM0006 estão resumidas no Quadro

1.

Quadro 1 – Ferramentas que compõem a metodologia ACM0006.

Código	Ferramenta	Principais Características
TOOL02	Ferramenta combinada para identificar o cenário de linha de base e demonstrar adicionalidade	<p>Fornece abordagem passo a passo para identificar o cenário de linha de base e demonstrar adicionalidade. Consiste em:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Passo 0: Demonstração de que uma atividade de projeto proposta é pioneira; - Passo 1: Identificação de cenários alternativos; - Passo 2: Análise de barreiras; - Passo 3: Análise de investimentos (se aplicável); e, - Passo 4: Análise de práticas comuns. <p>Para aplicação desses passos, são utilizadas outras quatro ferramentas: TOOL23, ANNEX 13, TOOL27 e TOOL 24.</p>
TOOL23	Adicionalidade de atividades de projeto pioneiras (atrelada ao Passo 0 da TOOL02)	Descreve a abordagem para verificar a adicionalidade da atividade de projeto pioneira.
ANNEX 13	Diretrizes para avaliação e demonstração objetiva de barreiras (atrelada ao Passo 2 da TOOL02)	Busca aprimorar a objetividade das abordagens para demonstrar e avaliar a adicionalidade do projeto, fornecendo abordagens quantitativas para a demonstração de barreiras. As diretrizes visam fornecer a base para uma decisão objetiva imparcial.
TOOL27	Análise de investimentos (atrelada ao Passo 3 da TOOL02)	Fornece aos empreendedores e EODs os requisitos para a preparação, apresentação e validação da análise de investimentos.
TOOL24	Práticas comuns (atrelada ao Passo 4 da TOOL02)	Fornece uma abordagem passo a passo para analisar se o tipo de projeto proposto já se difundiu no setor e região relevantes.
TOOL03	Ferramenta para calcular as emissões de CO ₂ de combustíveis fósseis do projeto	Fornece procedimentos para calcular as emissões de CO ₂ provenientes de combustíveis fósseis com base na quantidade de combustível queimado e em suas propriedades.

Quadro 1 - Ferramentas que compõem a metodologia ACM0006 (continuação).

Código	Ferramenta	Principais Características
TOOL04	Ferramenta para calcular as emissões oriundas da disposição de resíduos sólidos	Fornece procedimentos para calcular as emissões de CH ₄ da linha de base ou do projeto oriundas da disposição de resíduos sólidos, ou seja, as emissões que serão evitadas pelo aproveitamento da biomassa.
TOOL05	Ferramenta para calcular as emissões de linha de base, projeto e fugitivas provenientes do consumo de eletricidade, e para monitorar a geração de energia elétrica	Fornece procedimentos para calcular as emissões de linha de base, de projeto e fugitivas devido ao consumo de eletricidade. Também apresenta formas de monitorar a quantidade de eletricidade gerada pela usina do projeto.
TOOL07	Ferramenta para calcular o fator de emissão para um sistema de eletricidade	Determina o fator de emissão de CO ₂ para o deslocamento de eletricidade gerada pelas usinas em um sistema elétrico por meio do cálculo do fator de emissão da margem combinada (CM) do sistema elétrico, baseado em outros dois fatores de emissão: o de margem operacional (OM) e o de margem de construção (BM).
TOOL09	Ferramenta para determinar a eficiência dos sistemas de geração de energia elétrica ou térmica no cenário de linha de base	Fornece orientação metodológica para estimar a eficiência das unidades de energia térmica e de geração de energia elétrica para estimar as emissões de linha de base. É aplicável a sistemas de geração de energia que gere apenas eletricidade, produza apenas energia térmica ou produza eletricidade e energia térmica simultaneamente (cogeração).
TOOL10	Ferramenta para determinar a vida útil dos equipamentos	Fornece orientação para determinar a vida útil restante dos equipamentos do cenário de linha de base ou de projeto. A ferramenta pode, por exemplo, ser usada para atividades de projeto que envolvam a substituição de equipamentos existentes por novos equipamentos ou que modernizam equipamentos existentes como parte de atividades de melhoria de eficiência energética.
TOOL11	Ferramenta para avaliar a validade e a atualização da linha de base na renovação dos créditos de carbono	A ferramenta consiste em duas etapas: 1 - Fornecer uma abordagem para avaliar se a linha de base atual ainda é válida para o próximo período de crédito; e, 2 - fornecer uma abordagem para atualizar a linha de base, caso a linha de base atual não seja mais válida para o próximo período de crédito.

Quadro 1 - Ferramentas que compõem a metodologia ACM0006 (continuação).

Código	Ferramenta	Principais Características
TOOL12	Ferramenta para avaliar as emissões do transporte de carga	<p>Fornecer procedimentos para estimar as emissões de CO₂ do transporte rodoviário de carga por veículos. É aplicável às atividades do projeto que envolvem transporte de carga e onde o transporte não é a principal atividade.</p> <p>As emissões de CH₄ e N₂O são excluídas por simplificação porque são pequenas em comparação às emissões de CO₂.</p>
TOOL16	Ferramenta para estimar as emissões fugitivas de projeto e da biomassa	Fornecer procedimentos para calcular as emissões de projeto e fugitivas relevantes para as atividades de projeto que utilizam biomassa. Essa biomassa pode ser usada como combustível ou matéria-prima na atividade do projeto, e pode ser proveniente de resíduos ou cultivada em uma plantação dedicada.

Fonte: Elaborado a partir de UNFCCC (2009a; 2009b; 2012a; 2012b; 2015a; 2015b; 2015c; 2017a; 2017b; 2017c; 2017d; 2017e; 2018c; 2019b).

As emissões de GEE são então calculadas com base nas reduções de emissão em um ano y , considerando a unidade de crédito de carbono — conforme mencionado, 1 crédito de carbono equivale a 1 t CO_{2eq}. De acordo com UNFCCC (2018b), para obter as reduções de emissões finais, foi utilizada a equação 1.

$$ER_y = BE_y - PE_y - LE_y \quad (\text{Equação 1})$$

Em que:

ER_y = Emissões reduzidas no ano y (t CO₂)

BE_y = Emissões do cenário de linha de base no ano y (t CO₂)

PE_y = Emissões do cenário de projeto no ano y (t CO₂)

LE_y = Emissões fugitivas no ano y (t CO₂)

A partir das definições das ferramentas TOOL02, TOOL23, ANNEX 13, TOOL27 e TOOL 24, as emissões do cenário de linha de base no ano y (BE_y) foram calculadas pela equação 2.

$$BE_y = EL_{BL,GR,y} \times EF_{EG,GR,y} + \sum FF_{BL,HG,y,f} \times EF_{FF,y,f} + EL_{BL,FF/GR,y} \times \min(EF_{EG,GR,y}, EF_{EG,FF,y}) + BE_{BR,y} \quad (\text{Equação 2})$$

Em que:

$EL_{BL,GR,y}$ = Geração mínima de eletricidade da rede no ano y para o cenário de linha de base (MWh);

$EF_{EG,GR,y}$ = Fator de emissão da rede no ano y (t CO₂/MWh);

$FF_{BL,HG,y,f}$ = Demanda de combustível fóssil para o calor de processo no ano y para o cenário de linha de base (GJ);

$EF_{FF,y,f}$ = Fator de emissão de CO₂ para combustíveis fósseis do tipo f no ano y (t CO₂/GJ);

$EL_{BL,FF/GR,y}$ = Geração incerta de eletricidade na rede ou local no ano y para o cenário de linha de base (MWh) — equivale a zero, pois não há geração de eletricidade no cenário de linha de base;

$EF_{EG,FF,y}$ = Fator de emissão de CO₂ para geração de eletricidade a partir de combustíveis fósseis no local do projeto no ano y no cenário de linha de base (t CO₂/MWh) — não se aplica pois não há geração de eletricidade na planta no cenário de linha de base;

$BE_{BR,y}$ = Emissões devido ao descarte dos resíduos de biomassa no ano y para o cenário de linha de base (t CO₂) — inclusão opcional, foram consideradas emissões nulas;

y = ano do período de obtenção de créditos; e,

f = tipo de combustível fóssil.

Cada componente da equação 2 tem seus próprios métodos de cálculo ou são calculados a partir das ferramentas apresentadas. Em especial, o cálculo das emissões do cenário de linha de base segue as etapas mencionadas na sequência.

1. Etapa 1: Determinar a disponibilidade de biomassa, restrições de geração e capacidade de biomassa, eficiências e fatores de emissão de energia;
2. Etapa 2: Determinar a geração mínima de eletricidade de linha de base na rede — considerada nula pois não há usina de geração de energia elétrica no cenário de linha de base;
3. Etapa 3: Determinar a geração de calor e energia com base em biomassa no cenário de linha de base — considerada nula pois no cenário de linha de base, os resíduos de biomassa são despejados ou deixados em decomposição, principalmente em condições aeróbicas, e não há geração de calor e energia elétrica com base em biomassa;
4. Etapa 4: Determinar a demanda por combustíveis fósseis no cenário de linha de base para atender ao equilíbrio entre o calor de processo e a correspondente geração de eletricidade;
5. Etapa 5: Determinar, no cenário de linha de base, as emissões devido à queima não controlada ou deterioração dos resíduos de biomassa — considerada nula, por ser um item não obrigatório da ACM0006, optou-se pela não inclusão;
6. Etapa 6: Calcular as emissões do cenário de linha de base.

Já as emissões de projeto no ano y (PE_y) foram calculadas por meio da equação 3. Destaca-se que as emissões da construção e instalação da caldeira não são consideradas nessa equação.

$$PE_y = PE_{FF,y} + PE_{GR1,y} + PE_{GR2,y} + PE_{TR,y} + PE_{BR,y} + PE_{WW,y} + PE_{BG2,y} + PE_{BC,y} \quad (\text{Equação 3})$$

Em que:

$PE_{FF,y}$ = Emissões durante o ano y devido ao consumo de combustível fóssil no local do projeto (t CO₂) — no caso, essas emissões equivalem a zero;

$PE_{GR1,y}$ = Emissões durante o ano y devido à importação de eletricidade da rede para o local do projeto (t CO₂);

$PE_{GR2,y}$ = Emissões devido a uma redução na geração de eletricidade no local do projeto em comparação com o cenário da linha de base no ano y (t CO₂) — no caso, essas emissões equivalem a zero pois se trata de um projeto de instalação de uma nova caldeira, não havendo produção de energia antes da implantação do projeto;

$PE_{TR,y}$ = Emissões durante o ano y devido ao transporte de biomassa para a planta do projeto (t CO₂);

$PE_{BR,y}$ = Emissões da combustão de biomassa durante o ano y (t CO_{2eq}) — no caso, como é utilizada biomassa residual biogênica, a metodologia do MDL convencionada as emissões equivalentes a zero;

$PE_{WW,y}$ = Emissões de águas residuais geradas pelo tratamento de biomassa no ano y (t CO_{2eq}) — no caso, equivale a zero pois a biomassa residual utilizada não é tratada antes do uso nas caldeiras;

$PE_{BG2,y}$ = Emissões da produção de biogás no ano y (t CO₂) — no caso, equivale a zero pois o projeto não contempla biogás; e,

$PE_{BC,y}$ = Emissões do projeto associadas ao cultivo para produção de biomassa no ano y (t CO₂) — no caso, equivale a zero pois não há plantação dedicada de biomassa para atender o projeto.

Por fim, as emissões fugitivas no ano y (LE_y) são calculadas diretamente a partir da TOOL16. A principal fonte potencial de emissões fugitivas para esta atividade de projeto seria um aumento da combustão de combustíveis fósseis ou de outras fontes devido ao desvio de resíduos de biomassa de outros usos para a planta do projeto como resultado da atividade do projeto. No entanto, essas condições não se aplicam para o caso avaliado. Como o cenário de linha de base é definido por resíduos de biomassa despejados ou deixados em decomposição, principalmente em condições aeróbicas, as emissões desviadas pela atividade do projeto são nulas.

3.3 QUANTIFICAÇÃO DE IMPACTOS UTILIZANDO A ACV-O

A metodologia utilizada para a realização da ACV é detalhada pela NBR ISO 14040 (ABNT, 2009a) e pela NBR ISO 14044 (ABNT, 2009b). Considerando a intenção de analisar cenários antes e após a implantação de um projeto de MDL, foi realizada uma ACV-O e, portanto, a NBR ISO/TS 14072 (ABNT, 2019) também foi utilizada. Embora o MDL não considere todas as operações da fábrica, ele analisa as emissões de processos específicos que podem estar relacionados a diferentes operações, e não apenas a um produto específico, portanto, ACV-O se mostrou mais adequada, pois avalia os impactos associados à toda a indústria.

Assim, na sequência, será descrita a metodologia utilizada para a realização da ACV-O com base nas normas supracitadas, destacando-se que “a organização deve considerar o ciclo de vida completo para abranger todas as entradas e saídas relacionadas às atividades da organização” (ABNT, 2019).

3.3.1 Definição de objetivo e escopo

Conforme mencionado, foi realizada uma ACV-O para cada cenário apontado no item 3.1. O objetivo das modelagens é quantificar os impactos ambientais de uma indústria em dois cenários diferentes. A princípio, o público-alvo do estudo é a comunidade científica e, do ponto de vista metodológico, o trabalho será divulgado no meio acadêmico para subsidiar possíveis estudos que relacionam ACV e MDL, uma vez que a literatura disponível que engloba esses temas simultaneamente ainda é muito incipiente.

Quanto ao escopo do trabalho, na sequência estão descritas as principais considerações.

1. Organização a ser estudada: Uma indústria brasileira.
2. Unidade de referência: Produção total, em massa, em um ano, considerando produtos intermediários e produtos finais. O recorte temporal de um ano foi escolhido para se adequar ao escopo do MDL e da ACV-O.
3. Fronteira do sistema:

A fronteira adotada do sistema envolve desde a extração da matéria-prima até a produção final dos produtos, não envolvendo seu uso e disposição final. Essa fronteira foi definida levando em consideração que o objetivo do trabalho é realizar a comparação entre os

cenários 1 e 2. Uma vez que os produtos de ambos os cenários serão iguais, considera-se que seu uso e disposição final também serão equivalentes, não sendo necessária sua avaliação para a comparação. Além disso, aqui cabem duas considerações importantes: (i) a metodologia do MDL não considera o uso de um produto, apenas seu processo (ou etapas desse processo) de fabricação; (ii) o produto produzido é vendido como insumo para outras fábricas, não sendo, portanto, enviada diretamente para o consumidor final. Assim, foram considerados todos os fluxos elementares entre o berço e o portão. Além disso, foi adotada a abordagem de controle operacional. A fronteira do sistema está representada na Figura 7.



Fonte: Elaborado pela autora (2019).

4. Alocação:

Esta etapa se refere à distribuição dos impactos quando há mais de um produto ou função envolvidos na modelagem. No entanto, por se tratar de uma ACV-O, que avalia a organização como um todo, não é necessário alocar os impactos entre as diferentes unidades. Há uma pequena ressalva quanto aos resíduos enviados à reciclagem, etapa considerada multifuncional por tratar resíduos e fornecer matérias-primas secundárias para outro(s) processo(s). Neste caso, escolheu-se a abordagem de alocação por *cut-off*, o que significa que os resíduos chegam sem impacto ao reciclador e este assume os impactos do processo de reciclagem. Aqui cabe a mesma observação estabelecida na definição da fronteira do sistema: o objetivo é comparar dois cenários com relação à fonte energética, de forma que os impactos da reciclagem seriam iguais nos dois cenários, não alterando os resultados da análise. Além disso, acredita-se que, caso fosse escolhido outro método de alocação, provavelmente pouco influenciaria os resultados do estudo uma vez que a quantidade de materiais enviados para a reciclagem é pequena em relação aos fluxos principais da indústria.

5. Critérios de corte:

Não foram definidos critérios de corte que desconsiderassem algum material devido às representatividades de massa, de energia ou de significância ambiental. Porém, ao montar o

sistema de produto representado pela organização, alguns insumos não tinham representação na base de dados utilizada, de forma que não foram lançados no modelo. No entanto, esses insumos estão presentes em quantidades inexpressivas em relação aos demais utilizados na fábrica, de forma que é improvável que sua exclusão da modelagem tenha provocado alterações significativas nos resultados.

6. Tipos, fontes e requisitos de qualidade dos dados:

Foram coletados junto à indústria estudada dados primários do ano 2018. No entanto, o projeto de MDL leva em conta a produção total durante o ano de 2020. Portanto, para ajustar o escopo da ACV-O, os valores referentes às entradas e saídas de 2018 foram ajustados proporcionalmente à produção industrial de 2020. Os dados obtidos diretamente com a empresa são considerados precisos, consistentes e representativos da realidade da indústria. Ainda, as coberturas temporal, geográfica e tecnológica foram consideradas adequadas. De forma a complementar a estimativa dos impactos ambientais do sistema analisado, processos de montante, ou seja, acima da abrangência de controle da empresa, foram complementados com a versão 3.7 da base de dados Ecoinvent® (ECOINVENT, 2020), usando, sempre que possível, dados que representam a realidade brasileira, complementados, muitas vezes, por médias globais disponíveis. Visto que é comum que as indústrias não tenham controle sobre os processos que ocorrem à montante de sua produção, o uso de bases de dados é muito comum em modelagens de ACV. Para garantir completeza, consistência e representatividade das informações, as escolhas de modelagem, dados e outros pressupostos consideraram todos os elementos relevantes sobre o sistema de produto em análise, além de terem sido realizados balanços de massa dos processos unitários das entradas e saídas por unidade de produto. Portanto, os tipos, fontes e requisitos de dados foram considerados adequados para este projeto.

7. *Software* utilizado: OpenLCA 1.10.3 (GREENDELTA, 2020).

Por fim, destaca-se que dificilmente um modelo pode suprir exatamente o que acontece em uma situação real. Na ACV-O isso também acontece dada a grande quantidade de informações agregadas e a incerteza inerente a qualquer modelo.

3.3.2 Análise de Inventário do Ciclo de Vida

De acordo com a NBR ISO 14044 (ABNT, 2009b), a análise de inventário envolve a coleta de dados e os procedimentos de cálculo para quantificar as entradas e saídas relevantes

de um sistema de produto. Neste trabalho, esta etapa contemplou a coleta de dados primários da indústria avaliada, incluindo: entradas de energia; entradas de matéria-prima; outras entradas físicas; produtos; coprodutos; resíduos; emissões atmosféricas; e efluentes. Complementarmente, foi utilizada a base de dados Ecoinvent® versão 3.7 (ECOINVENT, 2020). Em especial, a própria metodologia do MDL fornece a base para estimar os dados das caldeiras nos cenários 1 e 2, de forma que os dados considerados para o modelo foram então baseados na ACM0006 (para o cenário 2) e complementados com o Ecoinvent® (para ambos os cenários). Destaca-se que o uso de dados secundários provenientes de uma base de dados representa dados médios que podem não ser a melhor representação possível dos aspectos de cada processo. Essa é uma limitação comum em estudos de ACV, e, para contorná-la, é preciso ampliar a coleta de dados específicos da indústria (BJÖRKLUND, 2002), englobando, inclusive, seus fornecedores.

Foram realizados procedimentos de cálculo para gerar os valores do inventário, adequando os dados brutos obtidos na fábrica de forma proporcional aos fluxos reportados definidos de acordo com a unidade de referência, ou seja, a produção total, em massa, da indústria analisada durante um ano, considerando produtos intermediários e produtos finais. Para tanto, foram utilizados: dados primários para todas as entradas de matéria-prima e energia da organização, inclusive transporte de insumos; dados primários para os resíduos gerados na indústria; dados primários para os produtos da organização; volume de efluentes gerado na organização em um ano (dado primário) adequado para um processo de tratamento de efluentes industriais do Ecoinvent® (dado secundário); e dados primários para as emissões atmosféricas dos fornos industriais. Sempre que necessário, foram feitas conversões de unidades para se adaptar ao modelo utilizado.

O inventário referente ao cenário 2 (com geração de vapor a partir de biomassa residual) é muito semelhante ao do cenário 1 (com geração de vapor a partir de combustíveis fósseis), porém com as adaptações que se seguem:

1. Retirada dos vapores que provém da queima de combustíveis fósseis, tal como apresentado na Figura 5 e na Figura 6.
2. Adaptação da energia elétrica para 34% do cenário 1, pois a nova caldeira produzirá, além de todo o vapor, 66% da energia que é consumida na planta (os 34% restantes serão adquiridos do SIN).
3. Transporte da biomassa necessária durante 1 ano por meio de caminhões a diesel.

4. As caldeiras demandarão consumo de água, o qual foi adequado para 1 ano de funcionamento no inventário do cenário 2.

As novas entradas de água e biomassa foram distribuídas proporcionalmente ao consumo de vapor de cada unidade produtiva da indústria.

Vale ressaltar que, apesar de estudos recentes que indicam que as emissões de biomassa não são necessariamente neutras em carbono (MUENCH; GUENTHER, 2013), pois essa condição de neutralidade depende de uma série de fatores a respeito da biomassa utilizada, a metodologia CDM ACM0006 considera que as emissões da queima de biomassa residual são equivalentes a zero porque provêm do carbono biogênico. Assim, considerando o objetivo principal deste trabalho de avaliar os potenciais impactos ambientais de um projeto de MDL, foram feitas as mesmas suposições do MDL para os cenários da ACV-O, de forma que as emissões da queima de biomassa foram consideradas nulas.

Por fim, os detalhes do inventário do ciclo de vida não serão fornecidos por este documento para respeitar a confidencialidade da indústria.

3.3.3 Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida

Conforme a NBR ISO 14044 (ABNT, 2009b), esta fase da ACV tem o objetivo de avaliar os impactos ambientais potenciais do sistema de produto em análise com base nos dados levantados pelo ICV. Para tanto, os dados inventariados foram associados a categorias de impacto específicas e a indicadores de cada categoria com base no método de AICV ReCiPe 2016 *midpoint* (H) (HUIJBREGTS *et al.*, 2016).

Uma vez que a intenção do trabalho foi avaliar quais impactos o projeto de MDL pode causar ou evitar além do Aquecimento Global, todas as categorias de impacto do método ReCiPe 2016 *midpoint* (H) foram analisadas. A abordagem *midpoint* foi escolhida porque normalmente tem menor incerteza em relação às entradas do inventário (HAUSCHILD; HUIJBREGTS, 2015) e porque permite avaliar cada categoria isoladamente. As categorias de impacto e suas respectivas características estão apresentadas nos quadros a seguir.

Quadro 2 – Categoria Formação de Material Particulado.

Categoria de impacto	Formação de Material Particulado
Indicador	Aumento da inalação de PM2.5 pela população
Fator de caracterização	Potencial de formação de material particulado
Unidade	kg PM2.5 eq para o ar
Referências para o modelo de caracterização	Van Zelm <i>et al.</i> (2016)

Fonte: Adaptado de Huijbregts *et al.* (2017).

Quadro 3 – Categoria Depleção de Recursos Fósseis.

Categoria de impacto	Depleção de Recursos Fósseis
Indicador	Aumento do potencial calorífico
Fator de caracterização	Potencial de combustíveis fósseis
Unidade	kg oil eq
Referências para o modelo de caracterização	Jungbluth e Frischknecht (2010)

Fonte: Adaptado de Huijbregts *et al.* (2017).

Quadro 4 – Categoria Ecotoxicidade Aquática.

Categoria de impacto	Ecotoxicidade Aquática
Indicador	Aumento de substâncias perigosas em água doce
Fator de caracterização	Potencial de ecotoxicidade aquática
Unidade	kg 1,4-DCB eq para água doce
Referências para o modelo de caracterização	Van Zelm <i>et al.</i> (2009)

Fonte: Adaptado de Huijbregts *et al.* (2017).

Quadro 5 – Categoria Eutrofização de Água Doce.

Categoria de impacto	Eutrofização de Água Doce
Indicador	Aumento de fósforo em água doce
Fator de caracterização	Potencial de eutrofização de água doce
Unidade	kg P eq para água doce
Referências para o modelo de caracterização	Helmes <i>et al.</i> (2012)

Fonte: Adaptado de Huijbregts *et al.* (2017).

Quadro 6 – Categoria Aquecimento Global.

Categoria de impacto	Aquecimento Global
Indicador	Aumento do forçamento radiativo infravermelho de um gás de efeito estufa
Fator de caracterização	Potencial de aquecimento global
Unidade	kg CO2eq para o ar
Referências para o modelo de caracterização	IPCC (2013); Joos <i>et al.</i> (2013)

Fonte: Adaptado de Huijbregts *et al.* (2017).

Quadro 7 – Categoria Toxicidade Humana Carcinogênica.

Categoria de impacto	Toxicidade humana carcinogênica
Indicador	Aumento do risco de incidência de doenças cancerígenas
Fator de caracterização	Potencial de toxicidade humana
Unidade	kg 1,4-DCB eq para o ar urbano
Referências para o modelo de caracterização	Van Zelm <i>et al.</i> (2009)

Fonte: Adaptado de Huijbregts *et al.* (2017).

Quadro 8 – Categoria Toxicidade Humana Não-Carcinogênica.

Categoria de impacto	Toxicidade Humana Não-Carcinogênica
Indicador	Aumento do risco de incidência de doenças não-cancerígenas
Fator de caracterização	Potencial de toxicidade humana
Unidade	kg 1,4-DCB eq para o ar urbano
Referências para o modelo de caracterização	Van Zelm <i>et al.</i> (2009)

Fonte: Adaptado de Huijbregts *et al.* (2017).

Quadro 9 – Categoria Radiação Ionizante.

Categoria de impacto	Radiação Ionizante
Indicador	Redução da absorção de radiação
Fator de caracterização	Potencial de radiação ionizante
Unidade	kBq Co-60 eq para o ar
Referências para o modelo de caracterização	Frischknecht <i>et al.</i> (2000)

Fonte: Adaptado de Huijbregts *et al.* (2017).

Quadro 10 – Categoria Uso do Solo.

Categoria de impacto	Uso do Solo
Indicador	Ocupação e transformação da terra
Fator de caracterização	Potencial de ocupação de terras agrícolas
Unidade	m ² ×yr crop eq
Referências para o modelo de caracterização	De Baan <i>et al.</i> (2013); Curran <i>et al.</i> (2014)

Fonte: Adaptado de Huijbregts *et al.* (2017).

Quadro 11 – Categoria Ecotoxicidade Marinha.

Categoria de impacto	Ecotoxicidade Marinha
Indicador	Aumento de substâncias perigosas em águas marinhas
Fator de caracterização	Potencial de ecotoxicidade marinha
Unidade	kg 1,4-DCB eq para a água do mar
Referências para o modelo de caracterização	Van Zelm <i>et al.</i> (2009)

Fonte: Adaptado de Huijbregts *et al.* (2017).

Quadro 12 – Categoria Eutrofização Marinha.

Categoria de impacto	Eutrofização Marinha
Indicador	Aumento de nitrogênio em água do mar
Fator de caracterização	Potencial de eutrofização de água do mar
Unidade	kg N eq
Referências para o modelo de caracterização	Cosme <i>et al.</i> (2017), Cosme <i>et al.</i> (2015)

Fonte: Elaborado a partir de National Institute for Public Health and the Environment (2017).

Quadro 13 – Categoria Escassez de Recursos Minerais.

Categoria de impacto	Escassez de Recursos Minerais
Indicador	Aumento de minério extraído
Fator de caracterização	Potencial excedente de minério
Unidade	kg Cu eq
Referências para o modelo de caracterização	Vieira <i>et al.</i> (2016)

Fonte: Adaptado de Huijbregts *et al.* (2017).

Quadro 14 – Categoria Formação de Ozônio (saúde humana).

Categoria de impacto	Formação de Ozônio (saúde humana)
Indicador	Aumento da absorção de ozônio troposférico pela população
Fator de caracterização	Potencial de formação de oxidantes fotoquímicos: humanos
Unidade	kg NO _x eq para o ar
Referências para o modelo de caracterização	Van Zelm <i>et al.</i> (2016)

Fonte: Adaptado de Huijbregts *et al.* (2017).

Quadro 15 – Categoria Formação de Ozônio (ecossistemas terrestres).

Categoria de impacto	Formação de Ozônio (ecossistemas terrestres)
Indicador	Aumento do ozônio troposférico
Fator de caracterização	Potencial de formação de oxidantes fotoquímicos: ecossistemas
Unidade	kg NO _x eq para o ar
Referências para o modelo de caracterização	Van Zelm <i>et al.</i> (2016)

Fonte: Adaptado de Huijbregts *et al.* (2017).

Quadro 16 – Categoria Depleção de Ozônio Estratosférico.

Categoria de impacto	Depleção de Ozônio Estratosférico
Indicador	Diminuição do ozônio estratosférico
Fator de caracterização	Potencial de depleção de ozônio
Unidade	kg CFC11eq para o ar
Referências para o modelo de caracterização	WMO (2011)

Fonte: Adaptado de Huijbregts *et al.* (2017).

Quadro 17 – Categoria Acidificação Terrestre.

Categoria de impacto	Acidificação Terrestre
Indicador	Aumento de prótons em solos naturais
Fator de caracterização	Potencial de acidificação terrestre
Unidade	kg SO ₂ eq para o ar
Referências para o modelo de caracterização	Roy <i>et al.</i> (2014)

Fonte: Adaptado de Huijbregts *et al.* (2017).

Quadro 18 – Categoria Ecotoxicidade Terrestre.

Categoria de impacto	Ecotoxicidade Terrestre
Indicador	Aumento de substâncias perigosas em solos naturais
Fator de caracterização	Potencial de ecotoxicidade terrestre
Unidade	kg 1,4-DCBeq para o solo industrial
Referências para o modelo de caracterização	Van Zelm <i>et al.</i> (2009)

Fonte: Adaptado de Huijbregts *et al.* (2017).

Quadro 19 – Categoria Consumo de Água.

Categoria de impacto	Consumo de Água
Indicador	Aumento do consumo de água
Fator de caracterização	Potencial de consumo de água
Unidade	m ³
Referências para o modelo de caracterização	Döll e Siebert (2002); Hoekstra e Mekonnen (2012)

Fonte: Adaptado de Huijbregts *et al.* (2017).

3.3.4 Interpretação

Nesta etapa, segundo a NBR ISO 14044 (ABNT, 2009b), as constatações da análise de inventário e da avaliação de impacto são consideradas em conjunto. A fase de interpretação da ACV-O fornece resultados consistentes com o objetivo e escopo definidos, bem como leva a conclusões, explica limitações e fornece recomendações. Os resultados obtidos nesta etapa subsidiaram a comparação entre os cenários 1 e 2 e foram apresentados em conjunto.

3.3.5 Comparação entre os resultados das ACV-Os

Esta fase do estudo visou comparar os resultados obtidos pelas ACV-Os. Ressalta-se, novamente, que a ACV-O não deve ser utilizada para comparar organizações diferentes, mas que é uma ferramenta robusta para avaliação do desempenho ambiental de uma mesma organização, de forma que a comparação é feita com base na mesma organização

(MARTINEZ-BLANCO *et al.*, 2015). Além disso, para a comparação, foram mantidos a mesma unidade de referência, fluxos reportados, qualidade dos dados e todas as demais considerações exceto aquelas apontadas no item 3.3.2.

Esta etapa metodológica não visou apenas avaliar os resultados, mas também identificar a existência de possíveis *trade-offs* entre os cenários 1 e 2. Para tanto, uma vez que esses cenários são muito semelhantes e que a unidade de referência é a mesma, a comparação foi realizada de forma direta, verificando possíveis alterações nas categorias de impacto.

Primeiramente, foram apresentados gráficos para exibir a diferença total entre os cenários de cada categoria de forma agregada para respeitar a confidencialidade da indústria. Em seguida, foram elaborados gráficos comparando os cenários 1 e 2 para cada categoria, apresentando também os principais *drivers* de contribuição de forma preferencialmente agregada, com exceção dos fluxos-chave para este trabalho, quais sejam: vapor, eletricidade e transporte por caminhões. Por fim, foi discutido o que pode ser realizado pelos tomadores de decisão em casos em que há *trade-offs* entre as categorias de impacto.

3.4 COMPARAÇÃO DA REDUÇÃO DE GEE PELO PROJETO DE MDL E PELA CATEGORIA DE IMPACTO AQUECIMENTO GLOBAL DA ACV-O

A fim de verificar possíveis divergências na quantificação de GEE por meio da ACV-O e do MDL, realizou-se, ainda, uma comparação dos resultados de cálculo de emissões. Uma vez que o principal objetivo de um projeto de MDL é a redução das emissões de GEE, o resultado calculado por meio da metodologia ACM0006 foi comparado com a redução de emissões quantificada por meio da ACV-O, ou seja, a diferença entre os resultados da categoria de impacto Aquecimento Global nos cenários 1 e 2.

A comparação se deu de forma quantitativa e qualitativa, a fim de identificar, nas metodologias, as possíveis razões para as diferenças entre os resultados. Para tanto, são apresentados os valores em porcentagem para respeitar a confidencialidade dos dados da indústria.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O Quadro 20 apresenta um resumo dos objetivos específicos atrelados aos procedimentos metodológicos necessários e principais resultados encontrados neste trabalho. Em seguida são apresentados e discutidos os resultados desta pesquisa.

Quadro 20 – Etapas da pesquisa.

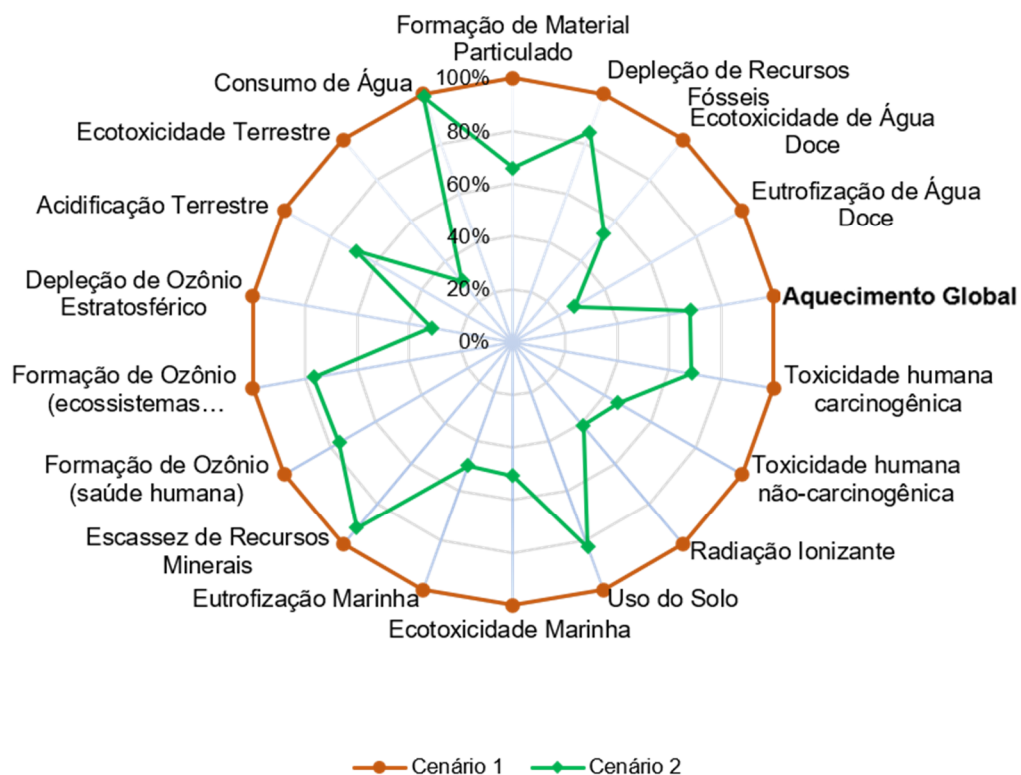
Objetivo específico	Procedimento metodológico	Ferramenta	Resultados
Calcular os potenciais impactos ambientais de uma organização considerando dois cenários, sendo um antes e outro após a implantação de um projeto de MDL.	Caracterização do sistema de produção da indústria antes e após a implantação do projeto de MDL.	Obtenção de dados primários junto à empresa.	Foram caracterizados dois cenários: cenário 1 da ACV-O equivalente à linha de base do MDL; e cenário 2 da ACV-O, equivalente ao cenário de projeto do MDL.
		Manuais da metodologia ACM0006 e respectivas ferramentas.	
	Quantificação de impactos de acordo com a ACV-O.	OpenLCA 1.10.3 Inventário Ecoinvent® ReCiPe 2016	Quantificação de impactos associados à cadeia de produção de uma indústria cuja energia térmica é obtida por meio da queima de carvão e óleo. Quantificação de impactos associados à cadeia de produção de uma indústria cuja energia térmica é obtida por meio da queima de biomassa residual proveniente da implantação de um projeto de MDL.
Comparar os impactos ambientais dos dois cenários analisados e identificar possíveis <i>trade-offs</i> entre as categorias de impacto.	Comparação entre os resultados das duas ACV-O realizadas.	Microsoft Excel.	A implantação do projeto de MDL avaliado causou redução em todas as 18 categorias de impacto.
Comparar a redução de emissões de GEE em um projeto de MDL a partir de dois métodos diferentes: MDL e ACV-O.	Quantificação de emissões de acordo com a metodologia ACM0006 do MDL.	Manuais da metodologia ACM0006 e respectivas ferramentas.	Houve diferença entre as reduções de emissões calculadas pelas duas metodologias. As diferenças metodológicas e de resultados entre ACV-O e ACM0006 foram discutidas.
	Comparação entre a redução de emissões calculadas pela ACV-O e pelo MDL.	Microsoft Excel.	

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

4.1 RESULTADOS DA ACV-O

Inicialmente, é apresentada uma visão geral dos impactos ambientais potenciais decorrentes do cenário 1 (linha de base) e do cenário 2 (atividade de projeto) para todas as categorias de impacto do método ReCiPe. A Figura 8 apresenta os resultados agregados dos dois cenários para comparação.

Figura 8 – Comparação entre os resultados dos cenários 1 e 2.



Fonte: elaborado pela autora (2021).

Os resultados indicaram que o referido projeto de MDL não apenas reduziu os impactos da categoria Aquecimento Global, mas também contribuiu para reduzir os potenciais impactos de todas as outras 17 categorias de impacto do método de AICV escolhido (ReCiPe 2016 *midpoint* - H). A maior redução de impacto foi de 73% e ocorreu na categoria Eutrofização de Água Doce, seguida de perto por Ecotoxicidade Terrestre (70%) e Depleção do Ozônio Estratosférico (69%). Por outro lado, a menor redução foi de 1% e ocorreu na categoria de impacto Consumo de Água. Os resultados indicam que o cenário geral de

implantação da atividade de projeto traz diversos benefícios ambientais. Vale ressaltar, entretanto, que essa condição não é necessariamente um padrão comum, e que *trade-offs* entre as categorias podem ocorrer dependendo do tipo e das características da atividade de projeto.

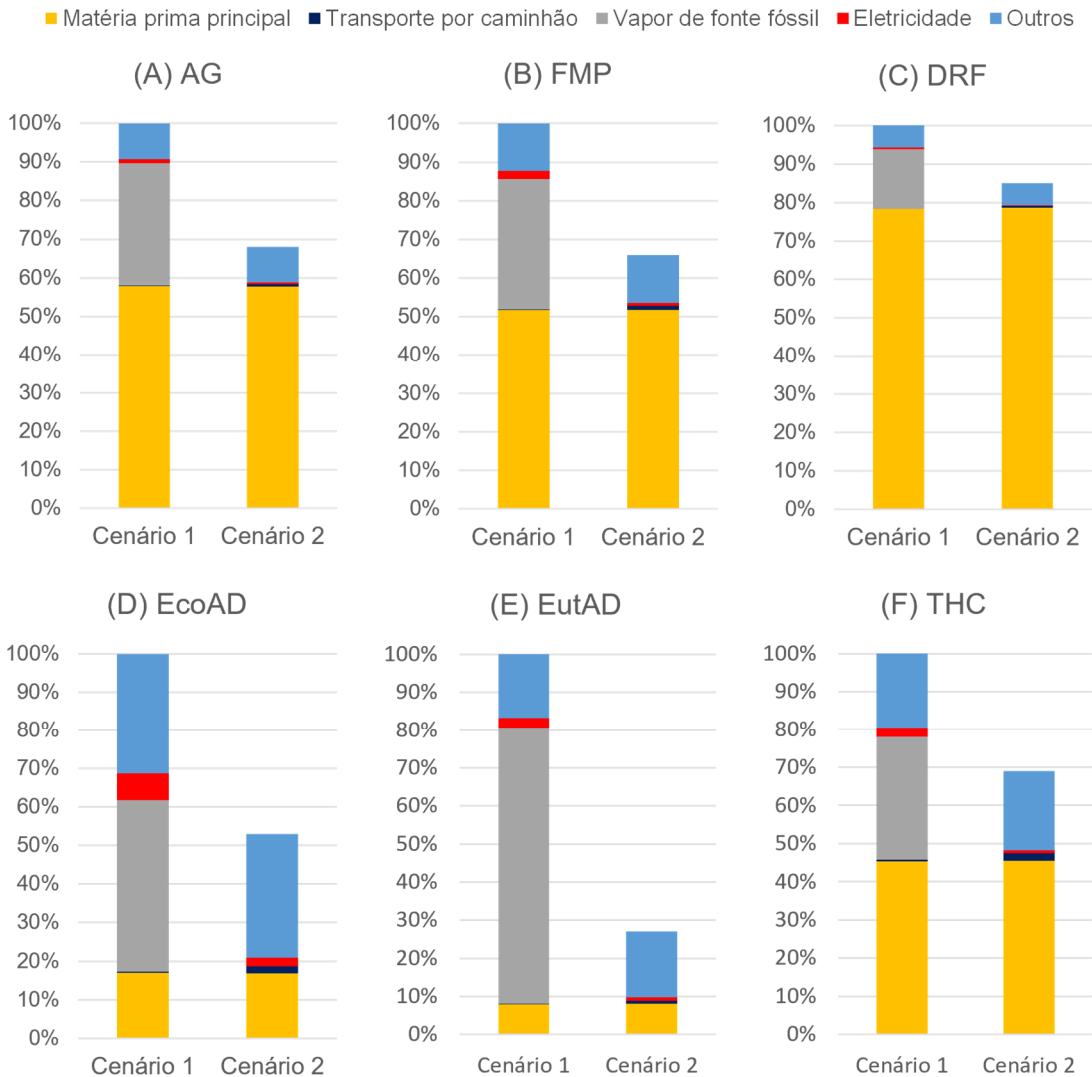
O trabalho de Buonocore *et al.* (2019) trouxe perspectivas interessantes do ponto de vista de energia e mudança climática. Os autores utilizaram ACV para avaliar os impactos ambientais de uma usina geradora de calor e eletricidade para um município italiano a partir de resíduos de madeira. Em seguida, os autores modelaram cenários com outras tecnologias de geração de energia a partir de fontes renováveis e não renováveis para comparação do cenário. Seus resultados indicaram que o uso de energia a partir de resíduos de madeira apresentou respostas melhores que os cenários a partir dos combustíveis fósseis analisados (gás natural, carvão e óleo). Por outro lado, apresentou resultados piores que energia gerada a partir de fonte eólica, geotérmica e solar fotovoltaica, que foram as demais fontes renováveis avaliadas. No entanto, diferentemente do caso analisado neste trabalho, o estudo de Buonocore *et. al* (2019) utilizava metano no cenário com biomassa para cobrir momentos de pico de demanda de energia, e esse gás foi o responsável pelos resultados de pior performance ambiental.

Considerando outros projetos de biomassa, Saidur *et al.* (2011) apontaram potenciais impactos negativos do uso dessa matéria-prima, a saber: uso da terra e recursos hídricos, erosão do solo, perda de biodiversidade e desmatamento. No entanto, nenhum desses problemas foi identificado no cenário 2, provavelmente porque foi usada biomassa residual de processos já existentes em vez de biomassa de uma floresta ou plantação dedicada. Outros artigos da literatura comparando os resultados da ACV de diferentes tipos de biomassa indicam que o plantio dedicado muitas vezes é mais impactante do que a biomassa residual (MUENCH; GUENTHER, 2013; GONZÁLEZ-GARCÍA *et al.*, 2014; WELFLE *et al.*, 2017).

Neste contexto, a seguir é apresentada a comparação dos perfis de impacto de cada categoria do ReCiPe 2016 *midpoint* (H) considerando os principais processos em cinco classes, a saber: matéria-prima principal da indústria (apresentada de forma agregada); transporte terrestre por caminhão; consumo de vapor de fonte fóssil (representando a caldeira do cenário 1); consumo de eletricidade; e a classe “outros”, que representa os demais processos de forma agregada a título de respeitar a confidencialidade da indústria. Em especial, para a categoria consumo de água, ao invés de apresentar a classe “vapor de fonte fóssil”, será apresentada a água consumida na caldeira em cada cenário, e, desagregada da categoria “outros”, será apresentada também a categoria “água dos processos” referente ao

consumo de água em outros processos da indústria e não atreladas à produção de vapor. Na sequência, os impactos ambientais potenciais estimados pela ACV-O são discutidos de forma conjunta de acordo com os principais *drivers* (grupos causadores dos impactos): vapor, eletricidade e transporte de biomassa por caminhão.

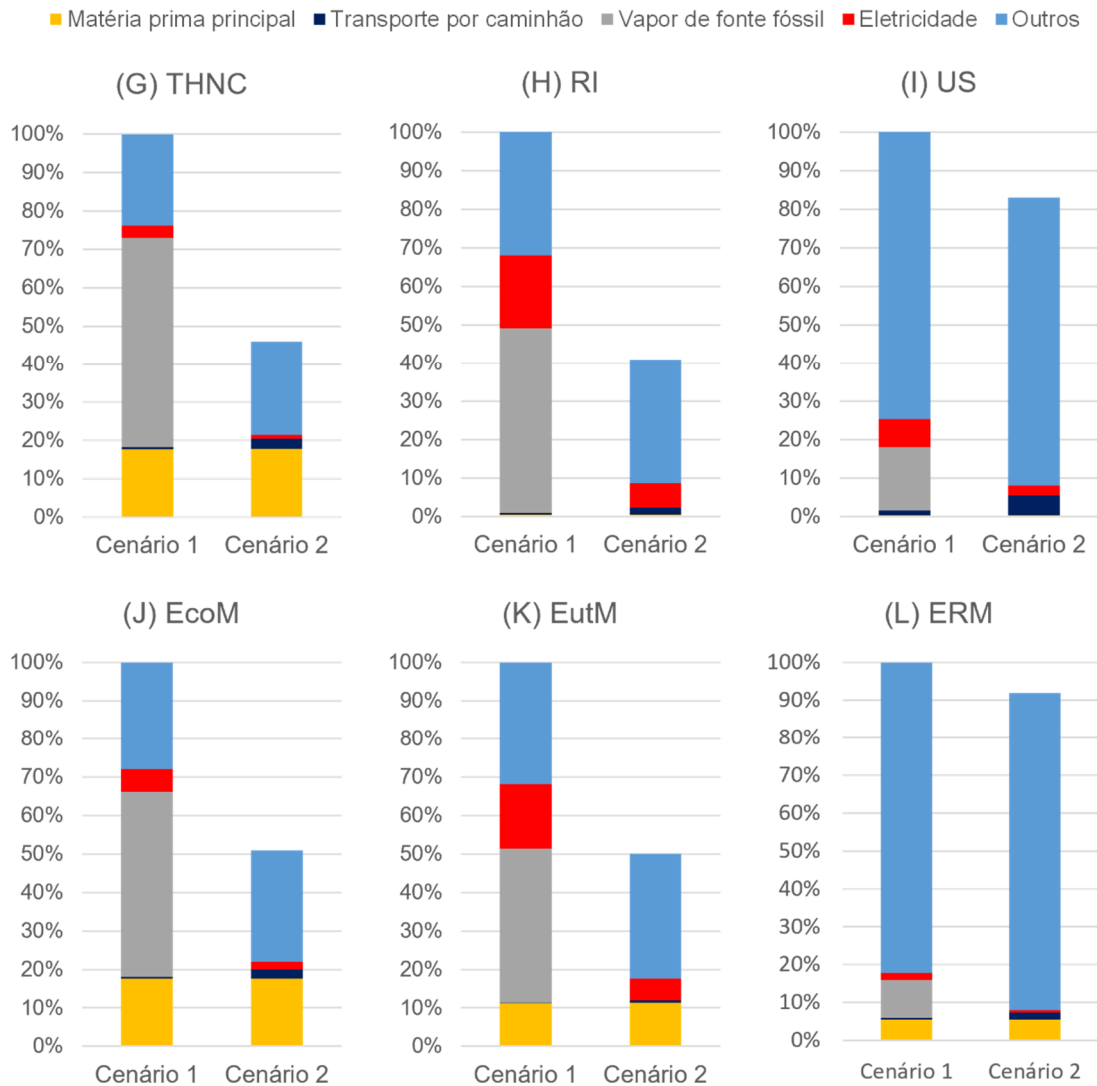
Figura 9 – Comparação entre os perfis dos resultados dos cenários 1 e 2 (parte 1).



Fonte: elaborado pela autora (2021).

Nota: AG – Aquecimento Global; FMP – Formação de Material Particulado; DRF – Depleção de Recursos Fósseis; EcoAD – Ecotoxicidade de Água Doce; EutAD – Eutrofização de Água Doce; THC – Toxicidade humana carcinogênica.

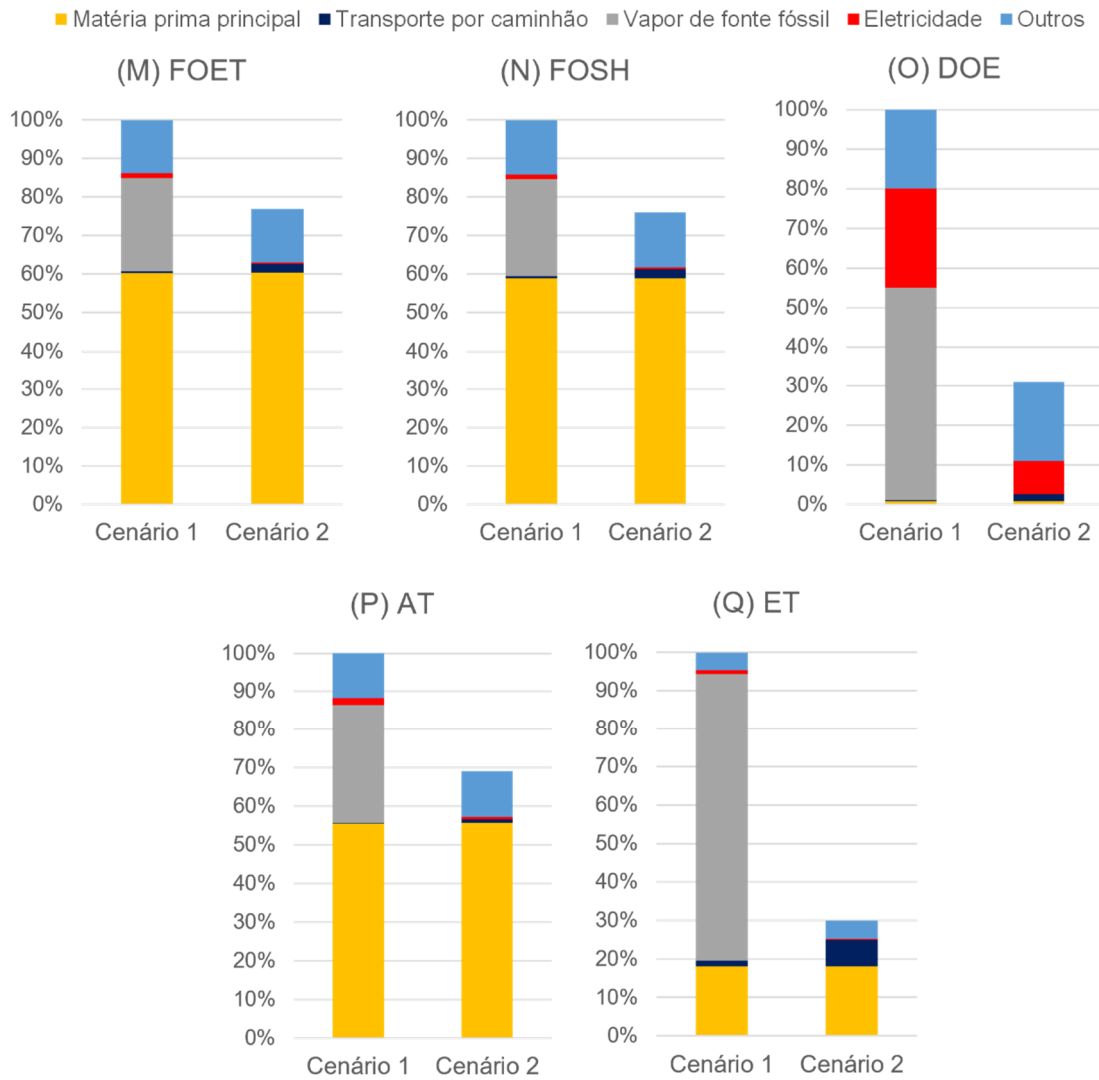
Figura 10 – Comparação entre os perfis dos resultados dos cenários 1 e 2 (parte 2).



Fonte: elaborado pela autora (2021).

Nota: THNC – Toxicidade humana não-carcinogênica; RI – Radiação Ionizante; US – Uso do Solo; EcoM – Ecotoxicidade Marinha; EutM – Eutrofização Marinha; ERM – Escassez de Recursos Minerais.

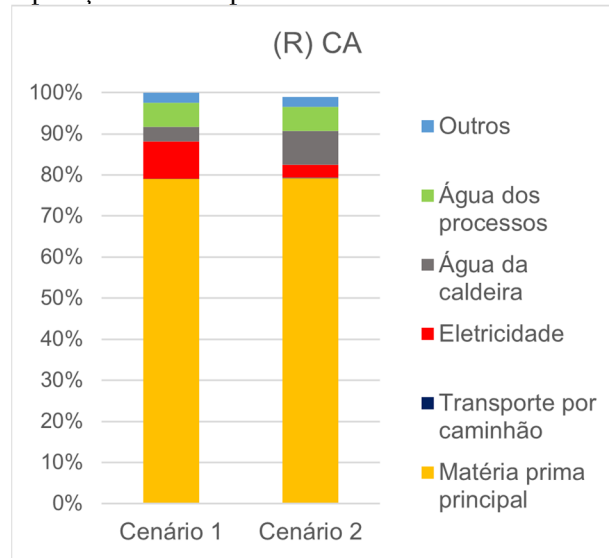
Figura 11 – Comparação entre os perfis dos resultados dos cenários 1 e 2 (parte 3).



Fonte: elaborado pela autora (2021).

Nota: FOET – Formação de Ozônio (ecossistemas terrestres); FOSH – Formação de Ozônio (saúde humana); DOE – Depleção de Ozônio Estratosférico; AT – Acidificação Terrestre; ET – Ecotoxicidade Terrestre.

Figura 12 – Comparação entre os perfis dos resultados dos cenários 1 e 2 (parte 4).



Fonte: elaborado pela autora (2021).

Nota: CA – Consumo de Água.

4.1.1 Vapor

O consumo de vapor afetou todas as categorias analisadas, portanto, a troca do combustível para a produção de vapor foi responsável pela maior parte da redução de impactos. Conforme mencionado anteriormente, a biomassa é considerada um recurso de energia renovável e pode desempenhar um papel importante na transição energética (HAWKEN, 2017; SAIDUR *et al.*, 2011). Portanto, o uso de biomassa para produção de energia térmica contribui para a redução das emissões de CO₂ em relação à energia gerada a partir de combustíveis fósseis, o que é consistente com outras pesquisas (GONZÁLEZ-GARCÍA *et al.*, 2014; RÖDER; THORNLEY, 2018). Isso ocorre justamente pela natureza biogênica das emissões de biomassa, o que implica que a mesma quantidade de CO₂ extraída do ar durante o período de crescimento da planta é liberada durante a queima, de forma que, em comparação com a combustão do carvão, as emissões de CO₂ possam ser reduzidas em aproximadamente 93% (SAIDUR *et al.*, 2011). Conforme mencionado, a redução considerada nesta pesquisa foi de 100% para se adequar à metodologia do MDL utilizada.

Hawken (2017) aponta que a matéria-prima da biomassa deve ser adequada para garantir a sustentabilidade do processo, o que inclui resíduos e culturas perenes capazes de contornar o desmatamento advindo do uso de florestas como biomassa para geração de

energia. Portanto, resíduos de madeira e do processamento agrícola são importantes fontes de biomassa. Além disso,

Muitos desses resíduos orgânicos se decomporiam no local ou seriam queimados em pilhas de corte, liberando assim o carbono armazenado de qualquer maneira (embora talvez por longos períodos de tempo). Quando a matéria orgânica se decompõe, geralmente libera metano e, quando é queimada em pilhas, libera carbono negro (fuligem). Tanto o metano quanto a fuligem aumentam o aquecimento global mais rápido do que o dióxido de carbono; simplesmente impedir que sejam emitidos pode render um benefício significativo, além de colocar a energia incorporada da biomassa para uso produtivo (HAWKEN, 2017, p. 16).

De acordo com Saidur *et al.* (2011), o uso de biomassa em caldeiras oferece inúmeras vantagens, incluindo mitigação de emissões, notadamente CO₂, NO_x (óxidos de nitrogênio), CH₄, SO_x (óxidos de enxofre) e CO (monóxido de carbono), associados aos impactos das categorias Formação de Material Particulado, Aquecimento Global, Depleção do Ozônio Estratosférico e Acidificação Terrestre. Assim, a biomassa é uma fonte de energia especialmente promissora para a substituição de combustíveis fósseis em caldeiras (SAIDUR *et al.*, 2011; GONZÁLEZ-GARCÍA *et al.*, 2014). No entanto, existem muitos caminhos possíveis para a biomassa, de forma que sua viabilidade ambiental deve ser avaliada caso a caso (MUENCH; GUENTHER, 2013). Outras vantagens do uso de biomassa mencionadas por Saidur *et al.* (2011) são a diversificação do fornecimento de combustível e segurança energética, a conservação de recursos fósseis (ligados à categoria Depleção de Recursos Fósseis) e a criação de oportunidades de emprego.

A categoria Aquecimento Global (Figura 9A) teve uma redução geral de 31,8%. O consumo de matéria-prima pela indústria foi o principal contribuinte para essa categoria, porém, por ser fortemente influenciado pelas emissões de GEE, principalmente CO₂ e CH₄ para a indústria analisada, a substituição de combustível fóssil por biomassa para geração de vapor ocasionou quase a totalidade da redução na categoria. Essa categoria especificamente será discutida em relação ao MDL no tópico 4.2 (Resultados do MDL e da categoria de impacto Aquecimento Global da ACV-O).

Os impactos da categoria Formação de Material Particulado (Figura 9B) também estão associados às emissões atmosféricas de SO₂ (dióxido de enxofre), NO_x, particulados menores que 2,5 µm e SO_x, principalmente relacionados aos processos de combustão. Em relação ao consumo de vapor, os impactos dessa categoria estão relacionados, por exemplo, à produção de calor no forno industrial de carvão, processo a montante que ocorre apenas no cenário 1, de modo que a categoria foi reduzida em 34,1%. De maneira semelhante, a

categoria Acidificação Terrestre (Figura 11P) também está relacionada às emissões atmosféricas de NO_x , SO_2 e SO_x , que se depositam no solo e alteram sua acidez, podendo prejudicar os ecossistemas. Essas emissões, além de ocorrerem durante a produção de calor, são geradas durante a produção das matérias-primas utilizadas. A redução dessa categoria em 31,3% deve-se, principalmente, à troca de vapor.

A Formação de Ozônio (O_3) se subdivide em duas categorias: Saúde Humana (Figura 11N) e Ecossistemas Terrestres (Figura 11M). Ambas tiveram redução muito semelhante por estarem relacionadas, principalmente, com as emissões atmosféricas de NO_x durante o processo produtivo. Para ambas as categorias, a troca de vapor significou uma redução de cerca de 25% entre os cenários 1 e 2. A formação de ozônio antropogênico está ligada a reações químicas impulsionadas pela radiação solar e que envolvem radicais OH^- , NO_x e compostos orgânicos voláteis exceto metano (PREISS, 2015). Como resultado, há a formação de O_3 , um composto altamente reativo, capaz de oxidar moléculas orgânicas (ROSENBAUM *et al.*, 2018). Assim, quando inalado, o O_3 pode irritar o sistema respiratório e causar diversos efeitos na saúde, e quando em contato com as plantas, pode danificar a vegetação e prejudicar a produtividade da cultura e a biodiversidade (PREISS, 2015; ROSENBAUM *et al.*, 2018).

A conservação de recursos fósseis também foi identificada como um benefício do uso de biomassa em caldeiras (SAIDUR *et al.*, 2011). Os resultados da ACV-O mostraram que a categoria Depleção de Recursos Fósseis (Figura 9C) teve uma redução total de 15,4% no cenário 2 em relação ao cenário 1. Essa categoria está relacionada ao uso de carvão, um recurso fóssil que foi usado para produção de vapor apenas no cenário 1. As matérias-primas também incluem recursos fósseis, mas, uma vez que não mudaram entre os cenários, não tiveram impacto na comparação entre eles.

A categoria Escassez de Recursos Minerais (Figura 10L) teve redução geral de 8% entre os cenários 1 e 2, sendo que as contribuições para esse impacto não foram majoritariamente causadas pelos principais fluxos avaliados — mais de 80% do impacto da categoria se deve à classe “outros”. Essa categoria se relaciona com extração de minerais como cobre, ferro, urânio, chumbo, entre outros, que em geral se refere a etapas a montante dos portões da fábrica.

A Toxicidade Humana Carcinogênica (Figura 9F) teve redução total de 31,3%. Esse impacto está relacionado ao tratamento e destinação de resíduos perigosos em diferentes etapas do ciclo de vida, mas principalmente em processos a montante. Na comparação entre os cenários 1 e 2, a categoria foi reduzida principalmente em decorrência dos processos a

montante relacionados ao vapor de combustíveis fósseis, reforçando mais uma vez que a troca de combustível no caso analisado reduz os impactos em relação ao uso de combustíveis fósseis.

A contribuição geral para a categoria de impacto Eutrofização de Água Doce (Figura 9E) foi reduzida em 73,2% do cenário 1 para o cenário 2, a maior redução da análise. Essa categoria tem o fósforo como principal indicador capaz de provocar a eutrofização. No cenário de linha de base, o fluxo de contribuição principal estava associado ao consumo de vapor, principalmente relacionado ao fosfato utilizado no beneficiamento do carvão, que é eliminado junto ao tratamento de resíduos da mineração, um processo a montante da fronteira da indústria que está presente apenas na produção de vapor do cenário 1, razão pela qual a troca da fonte de vapor causou uma redução expressiva da categoria. Em paralelo a isso, a categoria Eutrofização Marinha (Figura 10K) também está relacionada a processos que ocorrem a montante da indústria, majoritariamente relacionados a emissões para a água superficial e subterrânea de nitrito, nitrogênio e íon amônio. A mudança de combustível para a geração de vapor foi a principal responsável pelos 50% de redução na categoria entre os cenários 1 e 2.

Os impactos no Uso do Solo (Figura 10I) tiveram uma redução geral de 17,1% após a implementação do projeto de MDL. Os principais fluxos avaliados tiveram pouca contribuição nessa categoria, pois 75% dos impactos em ambos os cenários provêm da classe “outros”. No entanto, o cenário 1 teve uma contribuição de 16% do consumo de vapor, atrelado à área utilizada para a mineração de carvão. Além disso, considerando que a biomassa utilizada é residual e não proveniente de florestas plantadas com a finalidade específica de geração de vapor, o uso de biomassa não influenciou tanto essa categoria quanto poderia influenciar caso tivesse origem em uma plantação dedicada.

No cenário de linha de base, o consumo de vapor e eletricidade dominou os impactos para a categoria Depleção de Ozônio Estratosférico (Figura 11O). Essa categoria é afetada pelas emissões para a atmosfera de GEE como N_2O , CH_4 entre outras substâncias também relacionadas à produção de eletricidade, calor, petróleo e gás, todos usados principalmente no cenário 1, o que explica porque, após a implementação do MDL, os impactos nessa categoria foram reduzidos de forma tão significativa.

Quanto à Ecotoxicidade Marinha (Figura 10J), a categoria teve grande parte de suas emissões reduzidas entre os cenários 1 e 2 devido às alterações no vapor. Ecotoxicidade Marinha se relaciona a emissões para a água de íons metálicos como zinco, cobre, prata,

níquel, entre outros associados a processos de montante, especialmente relacionados a resíduos de diferentes etapas dos processos fora dos muros da indústria. A Ecotoxicidade de Água Doce (Figura 9D) teve comportamento muito semelhante uma vez que está ligada aos mesmos compostos.

Emissões para a água e para o ar de íons de zinco e outros metais, como mercúrio, chumbo, bário, entre outros, podem ocorrer durante o tratamento e disposição final de resíduos perigosos, contribuindo para a categoria Toxicidade Humana Não-Carcinogênica, (Figura 10G). Esses compostos estão mais presentes no cenário 1, de forma que a mudança da fonte de vapor provocou a redução dessa categoria em mais da metade. De forma análoga, o consumo de vapor também foi um dos principais *drivers* para a Ecotoxicidade Terrestre (Figura 11Q). Essa categoria também é afetada pela presença de metais como níquel, cobre, chumbo, mercúrio, entre outros, e por emissões relacionadas à produção de calor, de forma que a troca de combustível reduziu os impactos gerais da categoria.

Finalmente, a categoria Radiação Ionizante (Figura 10H) teve redução substancial entre os cenários 1 e 2, principalmente devido à mudança de combustível para geração de vapor. Essa categoria é afetada majoritariamente pelos processos de montante que fazem parte da produção de vapor no cenário 1 mas que estão fora dos muros da indústria. Durante os processos de queima podem ser gerados resíduos — como partículas para o ar ou cinzas — considerados perigosos e radioativos, que contribuem para essa categoria.

4.1.2 Eletricidade

Em relação à Eutrofização de Água Doce (Figura 9E), no cenário 2, após a troca de combustível, a contribuição de eletricidade foi reduzida pela metade. Na modelagem de ACV-O, a entrada de energia elétrica foi representada por um processo da base de dados Ecoinvent® que agrega características da matriz elétrica brasileira. Essa, por sua vez, abarca 64,9% de eletricidade proveniente de fontes hídricas, 8,4% de biomassa, 3,3% de carvão e derivados, entre outras fontes (EPE, 2020). Os resultados do modelo apontaram que esta categoria está relacionada à eletricidade advinda, principalmente, de carvão mineral, mais especificamente do tratamento de resíduos da mineração de carvão, um processo que ocorre a montante das fronteiras da indústria. Biomassa (bagaço de cana) e energia hidrelétrica também tiveram alguma influência na categoria, ainda que menor. Assim, a Eutrofização de Água Doce reduziu com a diminuição da aquisição de eletricidade do SIN porque a demanda

no cenário 2 é principalmente suprida pela geração de energia da caldeira, não estando mais relacionada a processos a montante para a geração de eletricidade.

Quanto à categoria Depleção de Ozônio Estratosférico (Figura 11O), houve grande redução da categoria após a troca do combustível usado para gerar vapor e eletricidade na nova caldeira, de forma que, no cenário de projeto, a contribuição da eletricidade foi reduzida para um terço em comparação com o cenário 1. Além disso, os impactos da eletricidade foram reduzidos em mais da metade em relação às categorias Uso do Solo (Figura 10I), Formação de Material Particulado (Figura 9B), Radiação Ionizante (Figura 10H), Toxicidade Humana Carcinogênica (Figura 9F), Toxicidade Humana Não-Carcinogênica (Figura 10G), Ecotoxicidade Marinha (Figura 10J) e Eutrofização Marinha (Figura 10K). É importante ressaltar que, além da presença de hidrelétricas e outras fontes consideradas renováveis de geração de energia, a matriz elétrica brasileira conta com 17% de fontes não renováveis (EPE, 2020). Substituir a eletricidade da rede por geração própria de fonte renovável pode, portanto, contribuir para a redução de impactos associados a geração de energia.

Por fim, a categoria com a menor redução geral foi Consumo de Água (Figura 12R). O vapor no cenário 1 teve pouca influência sobre essa categoria, e, conforme mencionado, as caldeiras para geração de vapor e eletricidade a partir de biomassa residual também exigem consumo de água para seu funcionamento, inclusive, conforme apresentado no gráfico, é utilizada mais água para gerar o vapor necessário no cenário 2 para manter a mesma unidade de referência que no cenário 1. No entanto, no que tange à eletricidade, ao trocar a maior parte da fonte de eletricidade da matriz brasileira (com mais da metade de fonte hídrica) por uma fonte de eletricidade de biomassa, os impactos relacionados à eletricidade do SIN se reduziram a um terço, de forma que, no total, essa categoria teve redução de 1,2%. Além disso, é possível que tenha ocorrido a eliminação de processos de montante relacionados ao vapor que também utilizavam água no cenário 1, contribuindo para a redução geral da categoria no cenário 2.

4.1.3 Transporte

No cenário 1, o principal processo para a categoria Ecotoxicidade Terrestre (Figura 11Q) foi o consumo de vapor. No cenário 2, enquanto as contribuições dos grupos vapor e eletricidade foram nulas, o transporte por caminhão aumentou sensivelmente, contribuindo com 7% dos impactos da categoria. Essa categoria é afetada pelas emissões de metais como

cobre, níquel, zinco e mercúrio para a atmosfera, principalmente relacionadas à produção de calor durante a combustão. Na forma de emissões para a água, esses componentes também afetam a categoria Toxicidade Humana Não-Carcinogênica (Figura 10G), que triplicou no cenário 2, chegando a 3% de contribuição para essa categoria.

A biomassa residual deveria ser transportada por caminhões movidos a diesel, que é um combustível fóssil impactante. De acordo com Chauhan *et al.* (2008), os combustíveis derivados do petróleo estão associados às emissões de NO_x, CO, HCs (hidrocarbonetos), material particulado, formaldeído, benzeno, tolueno, xileno, aldeídos, SO₂, CO₂ e CH₄. Essas emissões impactam a saúde humana e o meio ambiente, incluindo as categorias Toxicidade Humana Carcinogênica, no caso analisado principalmente por causa do benzeno, e Depleção de Ozônio Estratosférico, principalmente por causa das emissões de CH₄. Além disso, especificamente sobre o câncer, a Organização Mundial da Saúde afirma que a exposição de longo prazo a partículas é reconhecida como uma causa de câncer de pulmão (OMS, 2021).

Quanto à categoria Formação de Material Particulado (Figura 9B), o transporte por caminhão, que era desprezível no cenário 1, aparece no cenário 2 com 1% dos impactos. Essa categoria está ligada às emissões atmosféricas de SO₂, NO_x e partículas abaixo de 2,5 µm, também mencionadas para o *driver* vapor, e tipicamente relacionadas ao transporte rodoviário. Como a quantidade de vapor é muito superior à queima de combustível para transporte, mesmo com o aumento do transporte no cenário 2, houve redução geral de material particulado devido à substituição de carvão e óleo por biomassa na caldeira.

Além disso, o transporte quase quintuplicou para a categoria Uso do Solo (Figura 10I) ao comparar os cenários 1 e 2 devido à área utilizada para as estradas por onde passam os caminhões que transportam biomassa. No entanto, ainda é bem menos expressivo em comparação com a classe “outros”, principalmente porque a categoria é muito afetada pelo uso de paletes de madeira na indústria avaliada, característica que não mudou entre os cenários 1 e 2.

Por fim, vale ressaltar que, apesar do aumento para muitas categorias, os impactos causados pelo transporte por caminhão ainda são muito menores quando comparados aos demais *drivers* analisados, reafirmando que as mudanças decorrentes do projeto de MDL avaliado são benéficas no que diz respeito aos aspectos ambientais.

Além disso, as emissões da caldeira no cenário 1 são muito maiores do que as emissões do transporte no cenário 2. Embora os caminhões funcionem com diesel, um combustível fóssil assim como o carvão e o óleo utilizados para geração de vapor no cenário

1, a quantidade de combustível necessária para a caldeira é muito maior do que a quantidade necessária para o transporte de biomassa. Esse resultado é consistente com a pesquisa de Röder e Thornley (2018). Röder e Thornley (2018) realizaram modelos de ACV para geração de energia a partir de madeira em diferentes cenários de biomassa, dos quais a madeira não tratada é a mais semelhante à análise deste trabalho. Além disso, as autoras compararam seus resultados com opções de combustíveis fósseis e analisaram a incerteza quanto ao transporte de biomassa. Como resultado, a biomassa de madeira não tratada obteve “reduções de emissões significativas com variações relativamente pequenas”, e o transporte não foi crítico em comparação com outros processos avaliados e tampouco apresentou variação significativa.

A Tabela 2 consolida, de forma agregada, os principais *drivers* e as categorias de impacto mais afetadas por cada um deles conforme explicitado ao longo da discussão. Para a definição das categorias mais afetadas para cada driver, foram observados os resultados apresentados na Figura 9, Figura 10 e Figura 11 bem como a natureza de cada categoria. Primeiramente, observou-se que todas as categorias foram influenciadas pelo vapor, entretanto, essa influência foi considerada irrelevante para a categoria Consumo de Água (Figura 11R) uma vez que os *drivers* eletricidade e “outros” se mostraram mais relevantes.

Quanto aos *drivers* transporte por caminhão e eletricidade, cada categoria foi analisada individualmente. Embora em termos de proporcionalidade o impacto da eletricidade tenha reduzido e o do transporte por caminhão tenha aumentado em todas as categorias, em alguns casos esses grupos eram pouco representativos diante dos demais fluxos. Por isso, Eutrofização de Água Doce, por exemplo, foi considerada como impactada por vapor e eletricidade, enquanto Ecotoxicidade Terrestre foi considerada afetada por vapor e transporte por caminhão. Diversas categorias foram consideradas como afetadas apenas pelo vapor, como Aquecimento Global e Depleção de Recursos Fósseis. Nos casos em que todos os *drivers* se mostraram significativos, considerou-se que a categoria de impacto foi afetada por todos os três. Por fim, a natureza de cada categoria de impacto também foi considerada, de forma que a Formação de Material Particulado, por exemplo, embora possa parecer pouco representativa na Figura 9B para o *driver* transporte, foi analisada no âmbito de todos os *drivers* dadas as características da categoria, já mencionadas anteriormente.

Tabela 2 – Tabela-resumo: categorias de impacto e seus respectivos *drivers*.

Driver	Vapor	Eletricidade	Transporte
Categorias de impacto associadas	Aquecimento Global	Formação de Material Particulado	Formação de Material Particulado
	Formação de Material Particulado	Eutrofização de Água Doce	Toxicidade humana carcinogênica
	Depleção de Recursos Fósseis	Toxicidade humana carcinogênica	Toxicidade humana não-carcinogênica
	Ecotoxicidade Aquática	Toxicidade humana não-carcinogênica	Uso do Solo
	Eutrofização de Água Doce	Radiação Ionizante	Depleção de Ozônio Estratosférico
	Toxicidade humana carcinogênica	Uso do Solo	Ecotoxicidade Terrestre
	Toxicidade humana não-carcinogênica	Ecotoxicidade Marinha	
	Radiação Ionizante	Eutrofização Marinha	
	Uso do Solo	Depleção de Ozônio Estratosférico	
	Ecotoxicidade Marinha	Consumo de Água	
	Eutrofização Marinha		
	Escassez de Recursos Minerais		
	Formação de Ozônio (saúde humana)		
	Formação de Ozônio (ecossistemas terrestres)		
	Depleção de Ozônio Estratosférico		
	Acidificação Terrestre		
	Ecotoxicidade Terrestre		

Fonte: elaborado pela autora (2021).

4.1.4 Avaliação de *trade-offs*

Quanto ao uso de ACV para avaliar potenciais impactos colaterais da implantação de um projeto de MDL, a não identificação de *trade-offs* entre as categorias de impacto foi um resultado positivo pois não indicou efeitos danosos sob o ponto de vista ambiental. Porém, destaca-se que esse resultado tem caráter incipiente e não pode ser extrapolado para outros projetos de MDL inclusive que utilizem a mesma metodologia (ACM0006), pois as características de cada projeto bem como a origem da biomassa podem ter grandes variações. Conforme mencionado, existem mais de 200 metodologias de projetos de MDL e este trabalho contemplou um projeto e uma metodologia. Além disso, a carência de estudos semelhantes dificulta uma análise comparativa capaz de extrapolar as conclusões.

O que se pode afirmar, no entanto, é que os diversos empreendimentos passíveis de implantação de projetos de MDL podem apresentar as mais diferentes conformações, com seus próprios processos produtivos, escopos, fronteiras do sistema, porte da indústria, etc. O próprio uso de biomassa no lugar de combustíveis fósseis pode ter resultados diferentes a depender da biomassa utilizada, desde seu potencial calorífico até sua origem, afinal, no caso estudado é utilizada biomassa residual, o que provavelmente tem resultados diferentes caso o estudo fosse realizado, por exemplo, com biomassa proveniente de plantação dedicada. Além disso, a distância percorrida pelos caminhões responsáveis por levar a biomassa até a caldeira também influencia os resultados. No caso estudado, conforme apresentado, a contribuição referente ao uso de caminhões foi considerada insignificante em comparação com os demais processos, o que pode ocorrer em casos cuja distância percorrida pelos caminhões é relativamente pequena ou quando os demais processos da indústria têm maior influência relativa sobre as categorias de impacto.

Em casos em que há *trade-offs* entre os diferentes cenários, é preciso investigar com mais detalhes para tomar a decisão mais adequada sobre como proceder. Por exemplo, Hansen (2013) avaliou a substituição parcial de insumos em uma petroquímica na tentativa de reduzir seu potencial poluidor. Ao utilizar a ACV para tal avaliação, Hansen constatou que essa substituição viria acompanhada de *trade-offs*, ou seja, alguns impactos seriam menores, mas outros seriam maiores. Nesse tipo de situação, uma avaliação acompanhada de ponderação, ou seja, determinação de pesos para cada categoria de impacto, pode auxiliar na determinação acerca de qual impacto é mais relevante de acordo com o objetivo do projeto. Por outro lado, nem sempre a ponderação se baseia apenas na ciência, mas comumente em aspectos políticos

e sociais, podendo ser, portanto, uma etapa quantitativa ou qualitativa (DE BENEDETTO; KLEMES, 2009). Lopez-Mesa *et al.* (2009) destacam que a dificuldade de determinar se um impacto é mais importante que outro é uma das principais razões pelas quais o peso final resultante da ponderação é uma questão controversa.

Outra opção que pode ser utilizada é trabalhar com categorias do tipo *endpoint* ou até com indicador único, ferramentas que agregam uma série de categorias de impacto para avaliá-las em conjunto, sendo que as categorias do tipo *midpoint* são agregadas para formar indicadores do tipo *endpoint*, que, por sua vez, podem ser normalizados, ponderados e agregados em um indicador único (SEVERIS, 2018). A vantagem desse tipo de abordagem é tornar a situação como um todo mais clara para o tomador de decisão, mas tem como desvantagem o fato de que a agregação aumenta a incerteza sobre as informações.

O trabalho de Bare *et al.* (2000) sobre *midpoints* e *endpoints* é resultado de um *workshop* organizado pelo Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA) sobre AICV que reuniu opiniões de cerca de 50 especialistas. De acordo com Bare *et al.* (2000), *midpoints*, que também foram utilizados no caso do presente trabalho, são como um ponto na cadeia de causa e efeito de uma categoria de impacto antes dos *endpoints*, que representam a importância relativa de entradas e saídas de um ICV. No entanto, em estudos de ACV com análises de *trade-offs* ou agregação entre categorias de impacto, a abordagem do tipo *endpoint* tem ganhado cada vez mais destaque. Além disso, para fornecer uma estrutura de tomada de decisão consistente em AICVs comparativas com presença de *trade-offs*, o uso de ponderação ou de indicador único pode ser importante. Edgar Hertwich, da Universidade Norueguesa de Ciência e Tecnologia, afirmou durante o *workshop* que a análise por meio de *midpoints* permite avaliar a situação com mais confiança e menos incerteza, enquanto por meio de *endpoints* permite análise com mais relevância da magnitude dos impactos (BARE *et al.*, 2000).

Com base apenas na modelagem, a transparência associada à abordagem *midpoint* pode ser considerada maior que no caso de *endpoint*, porém, quando a ponderação é necessária para comparar e agregar as categorias de impacto, as relações implícitas entre os indicadores *midpoint* e os efeitos de *endpoint* nem sempre podem ser expressas com clareza, podendo afetar a robustez da ponderação e o resultado final (BARE *et al.*, 2000). Assim, indicadores *midpoint* e *endpoint* têm méritos e limitações complementares e o mais indicado é, sempre que possível, utilizar ambas as abordagens (BARE *et al.*, 2000). No caso deste trabalho, apenas a abordagem *midpoint* foi utilizada e os resultados de todas as categorias de

impacto foram convergentes, apontando o cenário 1 como o de maior impacto. Caso tivessem sido identificados *trade-offs* entre impactos, uma abordagem *endpoint* poderia complementar a análise dos cenários.

4.2 RESULTADOS DO MDL E DA CATEGORIA DE IMPACTO AQUECIMENTO GLOBAL DA ACV-O

O cálculo da redução de emissões de CO_{2eq} considerando a categoria Aquecimento Global da ACV resultou em um total de redução de emissões 15% maior que o calculado por meio da metodologia ACM0006 do MDL. Esperava-se que os resultados não fossem exatamente os mesmos, pois as metodologias fazem considerações diferentes, especialmente em relação ao âmbito de cobertura. Enquanto a ACV-O realiza uma análise ampla de todos os processos da indústria, o MDL se concentra na implantação da nova caldeira de geração de vapor e eletricidade, portanto, avaliar todas as atividades da indústria e os fluxos a montante ou a jusante da planta industrial está fora do escopo da metodologia. Além disso, os projetos de MDL consideram apenas os seis GEE estabelecidos no Protocolo de Quioto e mencionados anteriormente, enquanto a ACV-O contabiliza todas as emissões possíveis de um sistema ou organização (GENTIL *et al.*, 2009).

Assim, é importante considerar que a redução de emissões pelo MDL se dá em função da troca da fonte de eletricidade e calor, enquanto a redução por meio da ACV se dá em relação à todas as atividades da planta industrial, inclusive aquelas que ocorrem a montante com os fornecedores — e essa provavelmente é a principal razão para a diferença entre os resultados de redução de emissões. Embora a definição dos cenários 1 e 2 da ACV-O tenha sido estabelecida a partir do MDL, os cálculos de emissões da ACV-O são mais abrangentes. A retirada de vapor a partir da queima de carvão e óleo não reflete apenas nesse processo, mas também deixa de contabilizar uma série de processos a montante que têm potencial de gerar impactos, como extração de carvão nas minas, a geração e tratamento dos efluentes dessas minas, entre outros.

Além disso, a perspectiva da ACV-O pode subsidiar a avaliação de outros cenários que podem ser interessantes para empresas comprometidas em reduzir sua pegada ambiental. Além de avaliar as categorias de impacto, essa técnica permite identificar os processos mais impactantes da operação para que os tomadores de decisão possam avaliar as principais barreiras para a sustentabilidade e pensar em alternativas, como a substituição de insumos

impactantes ou a melhoria da eficiência na produção, ambos elementos importantes na busca pela melhoria contínua dos processos do ponto de vista ambiental. A busca de alternativas aos principais insumos, incluindo a busca por fornecedores locais, são exemplos de caminhos que podem ser avaliados com base na abordagem de ACV. Portanto, a ACV-O pode ser utilizada para avaliar os impactos ambientais associados às RCEs, sendo uma análise adicional capaz de complementar o MDL (CHUEN; YUSSOF, 2012).

Buonocore *et al.* (2019) apontam que o planejamento e a gestão de tecnologias de energia limpa devem ser baseados em uma avaliação capaz de contemplar os aspectos ambientais, ecológicos e socioeconômicos. Além disso, dada a complexidade das energias renováveis, estudos futuros poderiam integrar a ACV com outros métodos capazes de explorar a rentabilidade e o apelo social da bioenergia (BUONOCORE *et al.*, 2019), como o próprio MDL. No entanto, existem divergências sobre os benefícios sociais do MDL (OLSEN, 2007; BOYD *et al.*, 2009), que devem ser avaliados para cada projeto estudado. Em paralelo a isso, em seu trabalho sobre recuperação de resíduos alimentares para a geração de energia, Ingrao *et al.* (2018) apontaram a tendência crescente de estudos avaliarem sistemas energéticos sob uma perspectiva ambiental em busca de encontrar potenciais de melhorias. No que tange à bioenergia, os autores reforçaram a importância de uma perspectiva sistêmica em avaliação ambiental e tomada de decisão, como é o caso de uma ACV.

4.3 MDL, ACV E A CRISE CLIMÁTICA

A nível global, a matriz energética majoritariamente baseada em combustíveis fósseis ainda é responsável pela principal parcela de emissões de GEE no planeta, chegando a 76% em 2018, sendo 32% referente à geração de energia e calor e 17% referente ao transporte (CLIMATE WATCH HISTORICAL GHG EMISSIONS, 2021). Atualmente, sabe-se que os impactos das mudanças do clima interferem nas mais diversas esferas da sociedade, afetando as migrações humanas, a ocorrência de furacões mais severos, a produtividade agrícola, a ocorrência de doenças e diversas outras consequências (IPCC, 2018). Portanto, a transição para uma economia de baixo carbono é uma pauta urgente e vem sendo tratada com cada vez mais frequência por governos, empresas e organizações da sociedade civil. Além disso, a crise do clima foi apontada pelo Fórum Econômico Mundial (2021) como um dos maiores riscos para as economias, tanto no que tange aos eventos extremos quanto ao que uma possível falha em combater a crise climática pode provocar.

A crise do clima é bastante complexa e deve ser tratada a partir de múltiplas abordagens. Ao mesmo tempo que análises quantitativas são extremamente importantes, os impactos do aquecimento global carregam consigo uma parcela grande de subjetividade, inclusive por atingir, de maneira mais contundente, grupos de pessoas já vulneráveis (GORE, 2020; ALSTON, 2019). Assim, dificilmente técnicas estritamente quantitativas são capazes de determinar com exatidão a melhor forma de combater a crise climática. Dado o caráter transversal da pauta, não há saída única para garantir sobrevivência e qualidade de vida diante do agravamento das mudanças climáticas, mas sim diversas soluções que buscam mitigar os impactos e construir capacidade de resiliência e adaptação das sociedades. Dessa forma, é preciso utilizar tanto métodos subjetivos quanto quantitativos.

Neste contexto, uma visão integrada desses impactos é fundamental na hora de propor soluções. A ACV permite uma abordagem ampla ao tratar de determinado processo produtivo, sendo uma técnica robusta capaz de ajudar a identificar os principais gargalos do ciclo de vida de um produto, serviço ou organização, bem como de propor cenários capazes de endereçá-los da melhor forma possível. De fato, essa técnica tem sido utilizada como uma ferramenta para avaliar o desempenho ambiental de diferentes caminhos para o uso de energias renováveis (UIHLEIN; SCHEBEK, 2009; MUENCH; GUENTHER, 2013; GONZÁLEZ-GARCÍA *et al.*, 2014; WELFLE *et al.*, 2017; RÖDER; THORNLEY, 2018). Neste contexto, estudos de ACV como o trabalho de Muench e Guenther (2013) podem apontar benefícios associados à produção de bioenergia em termos de redução das emissões de GEE e balanço energético. Além disso, do ponto de vista prático, a ACV pode contribuir para a elaboração de estratégias de mitigação de emissões de empreendimentos já existentes.

Entretanto, como mencionado anteriormente, a ACV contempla, a princípio, os aspectos ambientais de um sistema produtivo, não abarcando os econômicos e sociais, que também são afetados pela crise do clima. Portanto, é importante que seja combinada com outras análises para minimizar efeitos colaterais fora do escopo ambiental, principalmente em projetos que têm consequências diretas sobre a sociedade civil.

Alston (2019) aponta que tem sido recomendado que os Estados estabeleçam metas nacionais para as emissões de GEE, intensifiquem os esforços para atingir as metas, façam a transição para a energia renovável, regulem os atores privados, mitiguem o impacto dos desastres naturais e protejam as populações vulneráveis. Todos os setores devem assumir responsabilidades pela redução de emissões (XI *et al.*, 2011).

Prosperidade econômica, trabalho decente e sustentabilidade ambiental são compatíveis e devem ser almejados em conjunto (ALSTON, 2019). O IPCC (2018) destaca a importância de mudanças drásticas na economia, no período mais curto possível, visando a produção de energia de forma eficiente, economicamente viável e com a diminuição de fontes intensas em carbono. São necessárias mudanças sem precedentes que envolvem transformação social e medidas ambiciosas de redução de emissões (IPCC, 2018), ou seja,

Não é possível, o relatório [do IPCC] estabelece, ter êxito nessa rápida eliminação da poluição com abordagens apenas tecnocráticas como impostos sobre o carbono, embora essas ferramentas devam desempenhar um papel. Em vez disso, requer uma mudança deliberada e imediata de como nossas sociedades produzem energia, como cultivamos nossos alimentos, como nos locomovemos e como nossos edifícios são construídos (KLEIN, 2019, p. 24).

Neste contexto, acredita-se que a ACV e o MDL podem contribuir para os desafios ambientais e climáticos que têm sido enfrentados e que irão se intensificar nos próximos anos. No caso do MDL, este tem potencial de contribuir no enfrentamento às mudanças climáticas durante a transição para uma economia de baixo carbono, especialmente no que se refere ao financiamento da descarbonização da economia, mas envolve aspectos sociais, econômicos e jurídicos que estão fora do escopo desta pesquisa e que precisam de regulamentação para gerar o impacto almejado e garantir integridade ambiental e social. É importante lembrar que o MDL é, antes de tudo, um mecanismo para redução de emissões, e sua proposta primordial, acima de gerar lucro pela venda de créditos, deve ser a redução de emissões de GEE.

Segundo Alston (2019, p. 11), “as barreiras são sociais e políticas, não tecnológicas ou econômicas”. Portanto, cabe às pessoas, em especial aos tomadores de decisão nas mais diversas esferas, ponderar análises quantitativas e subjetivas para traçar caminhos possíveis para evitar o colapso do clima e suas consequências desastrosas para o meio ambiente e a humanidade. Nas palavras de Klein,

uma das tarefas mais urgentes à frente é usar todas as ferramentas possíveis para demonstrar como nossas crises sobrepostas estão de fato intrinsecamente ligadas — e podem ser superadas apenas com uma visão holística para a transformação social e econômica (KLEIN, 2019, p. 267)

5 CONCLUSÕES

Esta pesquisa avaliou os impactos ambientais potenciais da implementação de um projeto de MDL usando ACV-O. Assim, foram avaliados os impactos ambientais potenciais de uma indústria considerando dois cenários, isto é, antes e depois da implementação de um projeto de MDL envolvendo a troca de combustível fóssil por biomassa residual. Inicialmente, foram caracterizados dois cenários para análise que foram a base para toda a pesquisa, sendo o cenário 1 antes da implantação do projeto de MDL e o cenário 2 após a implantação.

Na sequência, foram calculadas a redução de emissões por meio do MDL e os impactos ambientais por meio da ACV-O. Os resultados da metodologia ACM0006 do MDL indicaram que o consumo de vapor fornecido pela caldeira movida a combustíveis fósseis, bem como a energia elétrica da rede, tem contribuições importantes em termos de aquecimento global, e que a implantação de uma nova caldeira para geração de vapor pela queima de biomassa se mostrou benéfica em termos de emissões de GEE no caso analisado ainda que essa biomassa seja transportada por caminhões movidos a diesel.

Por sua vez, a ACV-O envolveu dados de todos os processos industriais e fornecedores representados no inventário, de forma que o modelo estimou outros impactos além do aquecimento global. A perspectiva de ciclo de vida permitiu perceber que as mudanças entre os cenários 1 e 2 reduziram os impactos relacionados não apenas às emissões de GEE, mas a uma série de outros processos que envolvem toda a cadeia de abastecimento a montante, incluindo processos muito além das fronteiras da indústria, como as minas de carvão no cenário de base. Assim, a ACV-O não indicou a existência de *trade-offs* entre as categorias de impacto dos cenários 1 e 2, de forma que o cenário 2 apresentou redução de todas as categorias de impacto em relação ao cenário 1.

A comparação entre os resultados indicou uma diferença de 15% na redução de emissões calculadas por meio do MDL e pela ACV-O. Em linhas gerais, essa diferença foi um reflexo da diferença de escopo entre as metodologias: o MDL se baseia no projeto a ser implantado, enquanto a ACV-O tem uma abordagem mais abrangente que abarca todos os processos a montante e a jusante dos muros da indústria, contabilizando emissões além do projeto a ser implantado.

Por fim, ressalta-se que este trabalho não propõe a substituição das metodologias de MDL da UNFCCC pela ACV-O para a geração de créditos de carbono, mas demonstra que a

ACV é uma técnica robusta de avaliação ambiental que tem o potencial de complementar os resultados do MDL para fornecer uma avaliação ambiental mais ampla. Assim, os resultados deste trabalho ainda são iniciais e não podem ser extrapolados para quaisquer projetos de créditos de carbono, mas podem contribuir com estudos futuros de análise ambiental do MDL.

6 RECOMENDAÇÃO DE PESQUISAS FUTURAS

Conforme evidenciado ao longo do trabalho, ainda há muito espaço para pesquisas no que tange à interface entre MDL e ACV. Pesquisas futuras podem incluir mais trabalhos com uma proposta parecida, ou seja, avaliar cenários antes e após a implantação de um projeto de MDL por meio da ACV-O, inclusive de projetos com outros tipos de biomassa, ou até avaliar os impactos caso as emissões de GEE da biomassa não fossem consideradas nulas.

Outra proposta para pesquisas futuras é comparar resultados dos cálculos de emissões por diferentes metodologias, e incluir, além da ACV-O e do MDL, os inventários de GEE do GHG Protocol, aprofundando o debate de como a metodologia escolhida pode influenciar os resultados finais.

Por fim, pesquisas futuras também podem abarcar estudos de ACV com uma abordagem ainda mais ampla, considerando, por exemplo, a decomposição anaeróbica da biomassa no cenário 1, de forma que no cenário 2 também possa ser considerado o GEE CH₄ que deixa de ser emitido com o uso da biomassa residual.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGAMUTHU, P; RAGOSSNIG, Arne M; VELIS, Costas. Publishing impactful interdisciplinary waste-related research on global challenges: circular economy, climate change and plastics pollution. **Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy**, [S.L.], v. 37, n. 4, p. 313-314, 22 mar. 2019. SAGE Publications. <http://dx.doi.org/10.1177/0734242x19837785>.

ALSTON, Philip. Conselho de direitos humanos da ONU. **Climate change and poverty: report of the special rapporteur on extreme poverty and human rights**. Geneva: 2019. 19 p. Disponível em: <https://digitallibrary.un.org/record/3810720>. Acesso em: 18 jan. 2021.

ALVARENGA, Rodrigo Augusto Freitas de; SILVA JÚNIOR, Vamilson Prudêncio da; SOARES, Sebastião Roberto. Comparison of the ecological footprint and a life cycle impact assessment method for a case study on Brazilian broiler feed production. **Journal Of Cleaner Production**, [s.l.], v. 28, p.25-32, jun. 2012. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.06.023>.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR ISO 14040: Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura**. Rio de Janeiro, 2009a. 21 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR ISO 14044: Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Requisitos e orientações**. Rio de Janeiro, 2009b. 46 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR ISO 14072: Gestão Ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Requisitos e diretrizes para a avaliação do ciclo de vida organizacional**. Rio de Janeiro, 2019. 29 p.

BANCO MUNDIAL. **State and Trends of Carbon Pricing**. Washington DC, 2019.

BJÖRKLUND, Anna E. Survey of Approaches to Improve Reliability in LCA. **International Journal Of Life Cycle Assessment**, [s. l.], p.64-72, 2002.

BOGNER, Jean; PIPATTI, Riitta; HASHIMOTO, Seiji; DIAZ, Cristobal; MARECKOVA, Katarina; DIAZ, Luis; KJELDSSEN, Peter; MONNI, Suvi; FAAIJ, Andre; GAO, Qingxian. Mitigation of global greenhouse gas emissions from waste: conclusions and strategies from the intergovernmental panel on climate change (ipcc) fourth assessment report. working group iii (mitigation). **Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy**, [S.L.], v. 26, n. 1, p. 11-32, fev. 2008. SAGE Publications. <http://dx.doi.org/10.1177/0734242x07088433>.

BÖHRINGER, Christoph; VOGT, Carsten. The dismantling of a breakthrough: the kyoto protocol as symbolic policy. **European Journal Of Political Economy**, [S.L.], v. 20, n. 3, p. 597-617, set. 2004. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejpoleco.2004.02.004>.

BOYD, Emily; HULTMAN, Nate; ROBERTS, J. Timmons; CORBERA, Esteve; COLE, John; BOZMOSKI, Alex; EBELING, Johannes; TIPPMAN, Robert; MANN, Philip;

BROWN, Katrina. Reforming the CDM for sustainable development: lessons learned and policy futures. **Environmental Science & Policy**, [S.L.], v. 12, n. 7, p. 820-831, nov. 2009. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envsci.2009.06.007>.

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações. **Autoridade Nacional Designada para o MDL**. Disponível em: [https://www.mctic.gov.br/mctic/opencms/ciencia/SEPED/clima/cimgc/Comissao Interministerial de Mudanca Global do Clima CIMGC.html](https://www.mctic.gov.br/mctic/opencms/ciencia/SEPED/clima/cimgc/Comissao_Interministerial_de_Mudanca_Global_do_Clima_CIMGC.html) . Acesso em: 01 dez. 2019.

BRASIL. **Intended Nationally Determined Contribution**: towards achieving the objective of the United Nations Framework Convention on climate change pursuant. [s.l.], 2015. Disponível em: <https://www4.unfccc.int/sites/submissions/INDC/Published%20Documents/Brazil/1/BRAZIL%20iNDC%20english%20FINAL.pdf>. Acesso em: 07 out. 2019.

BUONOCORE, Elvira; PALETTO, Alessandro; RUSSO, Giovanni F.; FRANZESE, Pier Paolo. Indicators of environmental performance to assess wood-based bioenergy production: a case study in northern italy. **Journal Of Cleaner Production**, [S.L.], v. 221, p. 242-248, jun. 2019. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.02.272>.

BYER, P.; CESTTI, R.; CROAL, P.; FISHER, W.; HAZELL, S.; KOLHOFFFF, A.; KØRNØV, L. **Climate Change in Impact Assessment**: International Best Practice Principles. Fargo: International Association for Impact Assessment, 2018.

BYGGETH, Sophie; HOCHSCHORNER, Elisabeth. Handling trade-offs in Ecodesign tools for sustainable product development and procurement. **Journal Of Cleaner Production**, [S.L.], v. 14, n. 15-16, p. 1420-1430, jan. 2006. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2005.03.024>

CHAUHAN, Sippy Kalra; GANGOPADHYAY, S.; SINGH, Nahar. Environmental aspects of biofuels in road transportation. **Environmental Chemistry Letters**, [S.L.], v. 7, n. 4, p. 289-299, 10 dez. 2008. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s10311-008-0185-7>.

CHRISTOFF, Peter. The promissory note: cop 21 and the paris climate agreement. **Environmental Politics**, [S.L.], v. 25, n. 5, p. 765-787, 3 jun. 2016. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/09644016.2016.1191818>.

CHUEN, Onn Chiu; YUSOFF, Sumiani. Benefits of clean development mechanism application on the life cycle assessment perspective: A case study in the palm oil industry. **Journal Of The Air & Waste Management Association**, [s.l.], v. 62, n. 3, p.299-306, 20 jan. 2012. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/10473289.2011.649822>.

CLIMATE WATCH HISTORICAL GHG EMISSIONS. 2021. Washington, DC: World Resources Institute. Disponível em: <https://www.climatewatchdata.org/ghg-emissions>. Acesso em 05 jul. 2021.

COSME, Nuno; KOSKI, Marja; HAUSCHILD, Michael Z.. Exposure factors for marine eutrophication impacts assessment based on a mechanistic biological model. **Ecological Modelling**, [S.L.], v. 317, p. 50-63, dez. 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2015.09.005>.

COSME, Nuno; MAYORGA, Emilio; HAUSCHILD, Michael Z.. Spatially explicit fate factors of waterborne nitrogen emissions at the global scale. **The International Journal Of Life Cycle Assessment**, [S.L.], v. 23, n. 6, p. 1286-1296, 19 jun. 2017. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s11367-017-1349-0>.

CURRAN, Mary Ann. Life Cycle Assessment: a review of the methodology and its application to sustainability. **Current Opinion In Chemical Engineering**, [s.l.], v. 2, n. 3, p.273-277, ago. 2013. <http://dx.doi.org/10.1016/j.coche.2013.02.002>.

CURRAN, Michael; HELLWEG, Stefanie; BECK, Jan. Is there any empirical support for biodiversity offset policy? **Ecological Applications**, [S.L.], v. 24, n. 4, p. 617-632, jun. 2014. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1890/13-0243.1>.

DE BAAN, Laura; ALKEMADE, Rob; KOELLNER, Thomas. Land use impacts on biodiversity in LCA: a global approach. **The International Journal Of Life Cycle Assessment**, [S.L.], v. 18, n. 6, p. 1216-1230, 24 abr. 2012. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s11367-012-0412-0>.

DE BENEDETTO, Luca; KLEMEŠ, Jiří. The Environmental Performance Strategy Map: an integrated lca approach to support the strategic decision-making process. **Journal Of Cleaner Production**, [S.L.], v. 17, n. 10, p. 900-906, jul. 2009. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2009.02.012>.

DE SCHEPPER, Ellen; LIZIN, Sebastien; DURLINGER, Bart; AZADI, Hossein; VAN PASSEL, Steven. Economic and Environmental Performances of Small-Scale Rural PV Solar Projects under the Clean Development Mechanism: the case of cambodia. **Energies**, [S.L.], v. 8, n. 9, p. 9892-9914, 11 set. 2015. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/en8099892>.

DÖLL, Petra; SIEBERT, Stefan. Global modeling of irrigation water requirements. **Water Resources Research**, [S.L.], v. 38, n. 4, p. 8-1, abr. 2002. American Geophysical Union (AGU). <http://dx.doi.org/10.1029/2001wr000355>.

DONG, Y.; HAUSCHILD, M.; SØRUP, H.; ROUSSELET, R.; FANTKE, P. Evaluating the monetary values of greenhouse gases emissions in life cycle impact assessment. **Journal of Cleaner Production**, v. 209, p. 538-549, 2019. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.205>.

ECOINVENT (2020). Swiss Centre for Life Cycle Inventories. The Ecoinvent Database. Disponível em: <https://www.ecoinvent.org/database/database.html>. Acesso em: jan. 2021.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE. **Balço Energético Nacional 2020: Ano base 2019**. Rio de Janeiro: 2020. 292 p. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-479/topico-528/BEN2020_sp.pdf. Acesso em: 04 ago. 2021.

FANTKE, Peter; ERNSTOFF, Alexi. LCA of Chemicals and Chemical Products: chemical synthesis and production processes. In: HAUSCHILD, Michael Z; ROSENBAUM, Ralph K.; OLSEN, Stig Irving (ed.). **Life Cycle Assessment: theory and practice**. Springer International Publishing, 2018.

FÓRUM ECONÔMICO MUNDIAL. **The Global Risks Report 2021**. 16. ed. Davos: 2021. Disponível em: http://www3.weforum.org/docs/WEF_The_Global_Risks_Report_2021.pdf. Acesso em: 04 abr. 2021.

FRISCHKNECHT, R.; BRAUNSCHWEIG, A.; HOFSTETTER, P.; SUTER, P. Human health damages due to ionising radiation in life cycle impact assessment. **Environmental Impact Assessment Review**, [S.L.], v. 20, n. 2, p. 159-189, abr. 2000. [http://dx.doi.org/10.1016/s0195-9255\(99\)00042-6](http://dx.doi.org/10.1016/s0195-9255(99)00042-6).

GENTIL, Emmanuel; CHRISTENSEN, Thomas H.; AOUSTIN, Emmanuelle. Greenhouse gas accounting and waste management. **Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy**, [S.L.], v. 27, n. 8, p. 696-706, 6 out. 2009. SAGE Publications. <http://dx.doi.org/10.1177/0734242x09346702>.

GONZÁLEZ-GARCÍA, Sara; DIAS, Ana Cláudia; CLERMIDY, Sónia; BENOIST, Antony; MAUREL, Véronique Bellon; GASOL, Carles M.; GABARRELL, Xavier; ARROJA, Luis. Comparative environmental and energy profiles of potential bioenergy production chains in Southern Europe. **Journal Of Cleaner Production**, [S.L.], v. 76, p. 42-54, ago. 2014. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.04.022>.

GREENDELTA. OpenLCA: Software livre. Versão 1.10.3. [S. l.], 2020. Disponível em: <http://www.openlca.org/>. Acesso em: 10 dez. 2020.

GUINÉE, Jeroen; HEIJUNGS, Reinout. Introduction to Life Cycle Assessment. In: BOUCHERY, Yann *et al* (Ed.). **Sustainable Supply Chains: A research-based textbook on operations strategy**. [S. l.]: Springer, 2017. Cap. 2. p. 15-41.

GUTIERREZ, Maria Bernadete. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (Ipea). O Brasil e o mercado de carbono. **Boletim Regional, Urbano e Ambiental**, Brasília, p.121-130, dez. 2009. Disponível em: http://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/5492/1/BRU_n3_Brasil.pdf. Acesso em: 20 nov. 2019.

HANSEN, Adriana Petrella. **Análise do efeito em termos de desempenho ambiental da substituição de eteno de origem fóssil por equivalente renovável na produção de poliestireno**. 2013. 227 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Química, Departamento de Engenharia Química, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

HAUSCHILD, Michael Z.; HUIJBREGTS, Mark A.J. (ed.). **Life Cycle Impact Assessment**. Springer Netherlands, 2015. (LCA Compendium – The Complete World of Life Cycle Assessment). <http://dx.doi.org/10.1007/978-94-017-9744-3>.

HAWKEN, Paul. **Drawdown**: the most comprehensive plan ever proposed to reverse global warming. Penguin Publishing Group (Edição do Kindle), 2017. 243 p.

HELMES, Roel J. K.; HUIJBREGTS, Mark A. J.; HENDERSON, Andrew D.; JOLLIET, Olivier. Spatially explicit fate factors of phosphorous emissions to freshwater at the global scale. **The International Journal Of Life Cycle Assessment**, [S.L.], v. 17, n. 5, p. 646-654, 2 fev. 2012. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s11367-012-0382-2>.

HOEKSTRA, A. Y.; MEKONNEN, M. M.. The water footprint of humanity. **Proceedings Of The National Academy Of Sciences**, [S.L.], v. 109, n. 9, p. 3232-3237, 13 fev. 2012. Proceedings of the National Academy of Sciences. <http://dx.doi.org/10.1073/pnas.1109936109>.

HUIJBREGTS, Mark A. J.; STEINMANN, Zoran J.N.; ELSHOUT, Pieter M.F.; STAM, Gea; VERONES, Francesca; VIEIRA, Marisa; ZIJP, Michiel; HOLLANDER, Anne; VAN ZELM, Rosalie. ReCiPe2016: a harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level. **The International Journal Of Life Cycle Assessment**, [s.l.], v. 22, n. 2, p.138-147, 12 dez. 2016. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s11367-016-1246-y>.

INGRAO, Carlo; FACCILONGO, Nicola; GIOIA, Leonardo di; MESSINEO, Antonio. Food waste recovery into energy in a circular economy perspective: a comprehensive review of aspects related to plant operation and environmental assessment. **Journal Of Cleaner Production**, [S.L.], v. 184, p. 869-892, maio 2018. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.267>.

INSTITUTE FOR ECONOMICS & PEACE (IEP). **Global Peace Index 2019**: Measuring Peace in a Complex World. Sydney, 2019. 107 f. Disponível em: <http://visionofhumanity.org/app/uploads/2019/07/GPI-2019web.pdf>. Acesso em: 02 jul. 2019.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). Organização das Nações Unidas. **Climate Change 2014**: Synthesis Report. Geneva: [s. l.], 2014. 151 p. Disponível em: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/SYR_AR5_FINAL_full.pdf. Acesso em: 01 dez. 2019.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Climate Change 2013 - The Physical Science Basis**. 2013. In: Stocker TF, QinD, PlattnerGK, TignorM, Allen SK, Boschung J, Nauels A, Xia Y, Bex V, Midgley PM (eds) Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge University Press. <http://dx.doi.org/10.1017/cbo9781107415324>.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Global Warming of 1.5°C**: summary for policymakers. Suíça: 2018. Disponível em: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/05/SR15_SPM_version_report_HR.pdf. Acesso em: 01 jun. 2021.

INTERNATIONAL STANDARDIZATIONS ORGANIZATION (ISO). **ISO 14040**: Environmental Management: Life Cycle Assessment - Principles and Framework. 2006.

INTERNATIONAL STANDARDIZATIONS ORGANIZATION (ISO). **ISO/TS 14072: Environmental management - life cycle assessment - requirements and guidelines for organizational life cycle assessment.** 2014.

JOOS, F.; ROTH, R.; FUGLESTVEDT, J. S.; PETERS, G. P.; ENTING, I. G.; VON BLOH, W.; BROVKIN, V.; BURKE, E. J.; EBY, M.; EDWARDS, N. R.. Carbon dioxide and climate impulse response functions for the computation of greenhouse gas metrics: a multi-model analysis. **Atmospheric Chemistry And Physics**, [S.L.], v. 13, n. 5, p. 2793-2825, 8 mar. 2013. Copernicus GmbH. <http://dx.doi.org/10.5194/acp-13-2793-2013>.

JUNGBLUTH, N.; FRISCHKNECHT, R. Cumulative Energy Demand, In: HISCHIER, R.; WEIDEMA, B. (ed.). **Implementation of Life Cycle Impact Assessment Methods:ecoinvent report No. 3, v2.2.** St Gallen: Swiss Centre for Life Cycle Inventories, 2010.

KADAM, Kiran L. Environmental benefits on a life cycle basis of using bagasse-derived ethanol as a gasoline oxygenate in India. **Energy Policy**, [S.L.], v. 30, n. 5, p. 371-384, abr. 2002. [http://dx.doi.org/10.1016/s0301-4215\(01\)00104-5](http://dx.doi.org/10.1016/s0301-4215(01)00104-5).

KLEIN, Naomi. **On fire: the (burning) case for a green new deal.** Nova York: Simon & Schuster Paperbacks, 2019. 321 p.

KUMARAPPAN, Subbu; JOSHI, Satish. Trading greenhouse gas emission benefits from biofuel use in US transportation: challenges and opportunities. **Biomass And Bioenergy**, [S.L.], v. 35, n. 11, p. 4511-4518, nov. 2011. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.09.018>.

LÓPEZ-MESA, Belinda; PITARCH, Ángel; TOMÁS, Ana; GALLEGO, Teresa. Comparison of environmental impacts of building structures with in situ cast floors and with precast concrete floors. **Building And Environment**, [S.L.], v. 44, n. 4, p. 699-712, abr. 2009. <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2008.05.017>.

MARTÍNEZ-BLANCO, Julia; INABA, Atsushi; FINKBEINER, Matthias. Scoping organizational LCA—challenges and solutions. **The International Journal Of Life Cycle Assessment**, [S.L.], v. 20, n. 6, p. 829-841, 21 abr. 2015. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s11367-015-0883-x>.

MATSUHASHI, Ryuji; MOMOBAYASHI, Yutaka; ISHITANI, Hisashi. Feasibility study on a CDM project utilizing photovoltaic systems. **Environmental Economics And Policy Studies**, [S.L.], v. 5, n. 2, p. 105-119, jun. 2002. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/bf03354025>.

MUENCH, Stefan; GUENTHER, Edeltraud. A systematic review of bioenergy life cycle assessments. **Applied Energy**, [S.L.], v. 112, p. 257-273, dez. 2013. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.06.001>.

NATIONAL INSTITUTE FOR PUBLIC HEALTH AND THE ENVIRONMENT. **ReCiPe 2016 v1.1**: A harmonized life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level. Report I: Characterization. 2017. Disponível em: <https://www.rivm.nl/documenten/recipe2016v11>. Acesso em: 01 ago. 2021.

NIJDAM, Durk; ROOD, Trudy; WESTHOEK, Henk. The price of protein: review of land use and carbon footprints from life cycle assessments of animal food products and their substitutes. **Food Policy**, [S.L.], v. 37, n. 6, p. 760-770, dez. 2012. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodpol.2012.08.002>.

OLSEN, Karen Holm. The clean development mechanism's contribution to sustainable development: a review of the literature. **Climatic Change**, [S.L.], v. 84, n. 1, p. 59-73, 24 maio 2007. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s10584-007-9267-y>.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). **Acordo de Paris**. Paris, 2015. 25 p.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). **Protocolo de Quioto**. Quioto, 1997. 20 p.

ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE (OMS). **Air quality and health**: type of pollutants. Type of pollutants. 2021. Disponível em: <https://www.who.int/teams/environment-climate-change-and-health/air-quality-and-health/health-impacts/types-of-pollutants>. Acesso em: 09 ago. 2021.

PREISS, Philipp. Capítulo 7: Formação Fotoquímica de Ozônio. In: HAUSCHILD, Michael Z.; HUIJBREGTS, Mark A.J. (ed.). **Life Cycle Impact Assessment**. Springer Netherlands, 2015. (LCA Compendium – The Complete World of Life Cycle Assessment). <http://dx.doi.org/10.1007/978-94-017-9744-3>.

REAP, J.; ROMAN, F.; DUNCAN, S.; BRAS, B. A survey of unresolved problems in life cycle assessment. **The International Journal Of Life Cycle Assessment**, [s.l.], v. 13, n. 4, p.290-300, 20 maio 2008. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s11367-008-0008-x>.

RIMANO, Michela; SIMBOLI, Alberto; TADDEO, Raffaella; RAGGI, Andrea. Life Cycle Approaches for the Environmental Impact Assessment of Organizations: defining the state of the art. **Administrative Sciences**, [S.L.], v. 9, n. 4, p. 94, 10 dez. 2019. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/admsci9040094>.

RÖDER, Mirjam; THORNLEY, Patricia. Waste wood as bioenergy feedstock. Climate change impacts and related emission uncertainties from waste wood based energy systems in the UK. **Waste Management**, [S.L.], v. 74, p. 241-252, abr. 2018. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2017.11.042>.

ROSENBAUM, Ralph K.; HAUSCHILD, Michael Z.; BOULAY, Anne-Marie; FANTKE, Peter; LAURENT, Alexis; NÚÑEZ, Montserrat; VIEIRA, Marisa. Chapter 10: Life Cycle Impact Assessment. In: HAUSCHILD, Michael Z.; ROSENBAUM, Ralph K.; OLSEN, Stig Irving (ed.). **Life Cycle Assessment: theory and practice**. Cham, Switzerland: Springer Nature, 2018. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-56475-3>.

ROY, Pierre-Olivier; AZEVEDO, Ligia B.; MARGNI, Manuele; VAN ZELM, Rosalie; DESCHÊNES, Louise; HUIJBREGTS, Mark A.J.. Characterization factors for terrestrial acidification at the global scale: a systematic analysis of spatial variability and uncertainty. **Science Of The Total Environment**, [S.L.], v. 500-501, p. 270-276, dez. 2014. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.08.099>.

SAIDUR, R.; ABDELAZIZ, E.A.; DEMIRBAS, A.; HOSSAIN, M.s.; MEKHILEF, S.. A review on biomass as a fuel for boilers. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, [S.L.], v. 15, n. 5, p. 2262-2289, jun. 2011. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2011.02.015>.

SEVERIS, Roni Matheus. **Consumo sustentável no transporte sob a óptica da avaliação do ciclo de vida**. 2018. 120 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciências Ambientais, Centro de Ciências Agroveterinárias, Universidade do Estado de Santa Catarina, Lages, 2018.

SILVA, Ariana Santos da; LOPES JÚNIOR, Wilson Martins. Algumas considerações sobre o mercado de créditos de carbono e os seus aspectos comerciais. **Caminhos de Geografia**, Uberlândia, p.18-29, out. 2012. Disponível em: <http://www.seer.ufu.br/index.php/caminhosdegeografia/article/view/16746>. Acesso em: 09 dez. 2019.

STERN, Nicholas. **The Stern Review: The Economics of Climate Change**. Cambridge, Uk: Cambridge University Press, 2007.

STICHNOTHE, Heinz; SCHUCHARDT, Frank. Comparison of different treatment options for palm oil production waste on a life cycle basis. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, [S.L.], v. 15, n. 9, p. 907-915, 27 jul. 2010. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s11367-010-0223-0>.

STOESSEL, Franziska; JURASKE, Ronnie; PFISTER, Stephan; HELLWEG, Stefanie. Life Cycle Inventory and Carbon and Water FoodPrint of Fruits and Vegetables: application to a swiss retailer. **Environmental Science & Technology**, [S.L.], v. 46, n. 6, p. 3253-3262, 1 mar. 2012. American Chemical Society (ACS). <http://dx.doi.org/10.1021/es2030577>.

TIM GORE. Oxfam. **Confronting carbon inequality: putting climate justice at the heart of the COVID-19 recovery**. 2020. 12 p. Disponível em: <https://oxfamilibrary.openrepository.com/bitstream/handle/10546/621052/mb-confronting-carbon-inequality-210920-en.pdf>. Acesso em: 01 jun. 2021.

UIHLEIN, Andreas; SCHEBEK, Liselotte. Environmental impacts of a lignocellulose feedstock biorefinery system: an assessment. **Biomass And Bioenergy**, [S.L.], v. 33, n. 5, p. 793-802, maio 2009. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2008.12.001>.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME (UNEP); SOCIETY OF ENVIRONMENTAL TOXICOLOGY AND CHEMISTRY (SETAC). **Guidance on Organizational Life Cycle Assessment**. Berlim: 2015. Disponível em: http://www.lifecycleinitiative.org/wp-content/uploads/2015/04/o-lca_24.4.15-web.pdf.

Acesso em 21 set. 2021.

UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE (UNFCCC). **ANNEX 13: Guidelines for objective demonstration and assessment of barriers**. Version 01. [S. l.]: [s. n.], 2009a. 5 p. Disponível em: https://cdm.unfccc.int/Reference/Guidclarif/meth/meth_guid38.pdf. Acesso em: 03 fev. 2020.

UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE (UNFCCC). Organização das Nações Unidas. **CDM Methodologies**. Disponível em: <https://cdm.unfccc.int/methodologies/index.html> . Acesso em: 01 dez. 2019a.

UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE (UNFCCC). Organização das Nações Unidas. **CDM Methodology Booklet**. 10. ed. [s.l.]: [s.n.], 2018a. Disponível em: https://cdm.unfccc.int/methodologies/documentation/1903/CDM-Methodology-Booklet_fullversion. Acesso em: 10 dez. 2019.

UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE (UNFCCC). **CDM Project Cycle**. Disponível em: <https://cdm.unfccc.int/Projects/diagram.html>. Acesso em: 04 fev. 2020.

UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE (UNFCCC). Organização das Nações Unidas. **Climate Change Information Sheet 17: The international response to climate change: A history**. 2000. Disponível em: <https://unfccc.int/cop3/fccc/climate/fact17.htm>. Acesso em: 10 dez. 2019.

UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE (UNFCCC). **Large-scale Consolidated Methodology: Electricity and heat generation from biomass**. Version 14.0. [S. l.]: [s. n.], 2018b. 74 p. Disponível em: https://cdm.unfccc.int/filestorage/B/8/U/B8UW1INYGZLP5OTSD6MHX9EKR7V0AQ/EB1_01_repan09_ACM0006.pdf?t=QzV8cjZubjY0fDCJt1DIKZ-RzH90Gr0uAAoT . Acesso em: 03 fev. 2020.

UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE (UNFCCC). **TOOL02: Combined tool to identify the baseline scenario and demonstrate additionality**. Version 07.0. [S. l.]: [s. n.], 2017a. 18 p. Disponível em: <https://cdm.unfccc.int/methodologies/PAmethodologies/tools/am-tool-02-v7.0.pdf> . Acesso em: 03 fev. 2020.

UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE (UNFCCC). **TOOL03: Tool to calculate project or leakage CO₂ emissions from fossil fuel combustion**. Version 03.0. [S. l.]: [s. n.], 2017b. 10 p. Disponível em: <https://cdm.unfccc.int/methodologies/PAmethodologies/tools/am-tool-03-v3.pdf>. Acesso em: 03 fev. 2020.

UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE (UNFCCC). **TOOL04:** Emissions from solid waste disposal sites. Version 08.0. [S. l.]: [s. n.], 2017c. 25 p. Disponível em: <https://cdm.unfccc.int/methodologies/PAMethodologies/tools/am-tool-04-v8.0.pdf>. Acesso em: 03 fev. 2020.

UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE (UNFCCC). **TOOL05:** Baseline, project and/or leakage emissions from electricity consumption and monitoring of electricity generation. Version 03.0. [S. l.]: [s. n.], 2017d. 25 p. Disponível em: <https://cdm.unfccc.int/methodologies/PAMethodologies/tools/am-tool-05-v3.0.pdf>. Acesso em: 03 fev. 2020.

UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE (UNFCCC). **TOOL07:** Tool to calculate the emission factor for an electricity system. Version 07.0. [S. l.]: [s. n.], 2018c. 60 p. Disponível em: <https://cdm.unfccc.int/methodologies/PAMethodologies/tools/am-tool-07-v7.0.pdf>. Acesso em: 03 fev. 2020.

UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE (UNFCCC). **TOOL09:** Determining the baseline efficiency of thermal or electric energy generation systems. Version 02.0. [S. l.]: [s. n.], 2015a. 13 p. Disponível em: <https://cdm.unfccc.int/methodologies/PAMethodologies/tools/am-tool-09-v2.0.pdf>. Acesso em: 03 fev. 2020.

UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE (UNFCCC). **TOOL10:** Tool to determine the remaining lifetime of equipment. Version 01. [S. l.]: [s. n.], 2009b. 5 p. Disponível em: <https://cdm.unfccc.int/methodologies/PAMethodologies/tools/am-tool-10-v1.pdf>. Acesso em: 03 fev. 2020.

UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE (UNFCCC). **TOOL11:** Assessment of the validity of the original/current baseline and update of the baseline at the renewal of the crediting period. Version 03.0.1. [S. l.]: [s. n.], 2012a. 3 p. Disponível em: <https://cdm.unfccc.int/methodologies/PAMethodologies/tools/am-tool-11-v3.0.1.pdf>. Acesso em: 03 fev. 2020.

UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE (UNFCCC). **TOOL12:** Project and leakage emissions from transportation of freight. Version 01.1.0. [S. l.]: [s. n.], 2012b. 9 p. Disponível em: <https://cdm.unfccc.int/methodologies/PAMethodologies/tools/am-tool-12-v1.1.0.pdf>. Acesso em: 03 fev. 2020.

UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE (UNFCCC). **TOOL16:** Project and leakage emissions from biomass. Version 04.0. [S. l.]: [s. n.], 2017e. 30 p. Disponível em: <https://cdm.unfccc.int/methodologies/PAMethodologies/tools/am-tool-16-v4.pdf>. Acesso em: 03 fev. 2020.

UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE (UNFCCC). **TOOL23**: Additionality of first-of-its-kind project activities. Version 03.0. [S. l.]: [s. n.], 2015b. 4 p. Disponível em: <https://cdm.unfccc.int/methodologies/PAMethodologies/tools/am-tool-23-v1.pdf>. Acesso em: 03 fev. 2020.

UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE (UNFCCC). **TOOL24**: Common practice. Version 03.1. [S. l.]: [s. n.], 2015c. 5 p. Disponível em: <https://cdm.unfccc.int/methodologies/PAMethodologies/tools/am-tool-24-v1.pdf>. Acesso em: 03 fev. 2020.

UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE (UNFCCC). **TOOL27**: Investment analysis. Version 10.0. [S. l.]: [s. n.], 2019b. 20 p. Disponível em: <https://cdm.unfccc.int/methodologies/PAMethodologies/tools/am-tool-27-v10.0.pdf>. Acesso em: 03 fev. 2020.

VAN ZELM, Rosalie; HUIJBREGTS, Mark A. J.; MEENT, Dik van de. USES-LCA 2.0—a global nested multi-media fate, exposure, and effects model. **The International Journal Of Life Cycle Assessment**, [S.L.], v. 14, n. 3, p. 282-284, 17 mar. 2009. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s11367-009-0066-8>.

VAN ZELM, Rosalie; PREISS, Philipp; VAN GOETHEM, Thomas; VAN DINGENEN, Rita; HUIJBREGTS, Mark. Regionalized life cycle impact assessment of air pollution on the global scale: damage to human health and vegetation. **Atmospheric Environment**, [S.L.], v. 134, p. 129-137, jun. 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.03.044>.

VIEIRA, Marisa D. M.; PONSIOEN, Thomas C.; GOEDKOOP, Mark J.; HUIJBREGTS, Mark A. J.. Surplus Ore Potential as a Scarcity Indicator for Resource Extraction. **Journal Of Industrial Ecology**, [S.L.], v. 21, n. 2, p. 381-390, 18 jun. 2016. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1111/jiec.12444>.

WELFLE, Andrew; GILBERT, Paul; THORNLEY, Patricia; STEPHENSON, Anna. Generating low-carbon heat from biomass: life cycle assessment of bioenergy scenarios. **Journal Of Cleaner Production**, [S.L.], v. 149, p. 448-460, abr. 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.02.035>.

WORLD COMMISSION ON ENVIRONMENT AND DEVELOPMENT (WCED). **Our common future**. Oxford: Oxford Press, 1987.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION (WMO). **Scientific assessment of ozone depletion: 2010, Global Ozone Research and Monitoring Project-report no.52**. Switzerland: Geneva, 2011.