

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA DE SÃO JOÃO DA BOA VISTA
ENGENHARIA ELETRÔNICA E DE TELECOMUNICAÇÕES

VINICIUS BITTAR DE PONTES

AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DO CABO ELÉTRICO UNIPOLAR DE ALUMÍNIO

SÃO JOÃO DA BOA VISTA

2024

VINICIUS BITTAR DE PONTES

AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DO CABO ELÉTRICO UNIPOLAR DE ALUMÍNIO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Universidade Estadual Paulista “Júlio de
Mesquita Filho” como requisito para obtenção
de título de Bacharel em Engenharia Eletrônica
e de Telecomunicações

Orientador: Prof. Dr. José Augusto de Oliveira

SÃO JOÃO DA BOA VISTA

2024

P814a

Pontes, Vinicius Bittar de

Avaliação do ciclo de vida do cabo elétrico unipolar de alumínio /
Vinicius Bittar de Pontes. -- São João da Boa Vista, 2024
29 p. : tabs.

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Engenharia de
Telecomunicações) - Universidade Estadual Paulista (UNESP),
Faculdade de Engenharia, São João da Boa Vista

Orientador: José Augusto de Oliveira

1. Ciclo de vida do produto. 2. Cabos elétricos. 3. Impacto
ambiental. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Universidade
Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia, São João da Boa Vista. Dados fornecidos
pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE SÃO JOÃO DA BOA VISTA
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELETRÔNICA E DE TELECOMUNICAÇÕES**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DO CABO ELÉTRICO UNIPOLAR DE
ALUMÍNIO**

Aluno: Vinicius Bittar de Pontes

Orientador: Prof. Dr. José Augusto de Oliveira

Banca Examinadora:

- José Augusto de Oliveira (Orientador)
- Lana Sobral Vieira Escada Monteiro (Examinadora)
- Carla Rafaelli Martins (Examinadora)

Os formulários de avaliação e a ata da defesa, na qual consta a aprovação do trabalho, devidamente assinados pela banca encontram-se no prontuário eletrônico do aluno.

São João da Boa Vista, 05 de agosto de 2024

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho de conclusão de curso à minha amada família, fonte inesgotável de apoio, amor e inspiração. Agradeço a meu pai e minha mãe por serem a base sólida em que construí meus sonhos, e à minha querida vó, cuja sabedoria e carinho são faróis em minha jornada acadêmica.

Às amigas que encontrei na faculdade, agradeço de coração. Yago, Lucas e Anderson, vocês foram mais do que colegas; foram companheiros de desafios, risadas e conquistas. Juntos, tornamos esta jornada acadêmica ainda mais leve e especial, sem essas amigas, a minha trajetória teria sido muito mais árdua.

Ao meu dedicado orientador, Professor José Augusto de Oliveira, expresso minha profunda gratidão. Suas orientações precisas e paciência incansável foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho. Muito obrigado, Professor, por sua contribuição significativa para o sucesso deste trabalho e para o meu crescimento como acadêmico.

A todos que, de alguma forma, contribuíram para esta trajetória, o meu profundo agradecimento. Este trabalho é resultado não apenas do meu esforço, mas também do apoio e incentivo de pessoas incríveis ao meu redor. Muito obrigado a cada um de vocês.

RESUMO

Mesmo com a revolução do 5G, as conexões com fio ainda apresentam diversas vantagens na indústria manufatureira. O aumento expressivo na produção dos cabos elétricos é atribuído à crescente importância desses produtos para o desenvolvimento tecnológico. Esse aumento na produção está diretamente relacionado a um crescimento dos impactos ambientais negativos associados ao processo produtivo desses cabos. Sendo assim, estudos precisam ser realizados para a proposição de alternativas para a prevenção e minimização de impactos ambientais negativos no ciclo de vida desse produto. Para isso é preciso conhecer e classificar estes impactos. No entanto, há uma escassez de estudos sobre a avaliação do ciclo de vida (ACV) dos cabos elétricos de alumínio, tendo em vista a grande prevalência desse produto atualmente. O objetivo deste trabalho é explorar a ACV desses cabos com ênfase na unidade funcional de 1000 metros, identificar seus impactos ambientais e avaliar cenários mais sustentáveis de produção. Utilizando o *software* LCA for Experts (GaBi), foram construídos ciclos de vida *Cradle-to-Gate*. A coleta de dados envolveu formulários estruturados e visitas à fabricante. A análise baseou-se no método ReCiPe 2016 v.1.1 *Midpoint*, com normalização e comparação de cenários. Os principais impactos ambientais foram consumo de água doce, depleção fóssil, mudanças climáticas e toxicidade humana. Os resultados destacaram a importância do material condutor (alumínio) nos impactos ambientais. A ponderação forneceu uma visão equilibrada das categorias de impacto mais relevantes, enquanto os gráficos normalizados ilustraram variações entre os cenários, identificando *hotspots*. Conclui-se que a substituição do alumínio primário pelo secundário apresenta diferenças significativas, ressaltando a necessidade de considerações cuidadosas para promover práticas mais sustentáveis na produção de cabos elétricos.

Palavras-chave: Avaliação do ciclo de vida; Cabo elétrico de alumínio; Sustentabilidade; Impactos ambientais.

ABSTRACT

Even with the revolution of 5G, wired connections still present several advantages in the manufacturing industry. The significant increase in the production of electrical cables is attributed to their growing importance in technological development. This rise in production is directly linked to an escalation of environmental impacts associated with the cable manufacturing process. Therefore, studies need to be conducted to propose alternatives for preventing and minimizing negative environmental impacts throughout the product life cycle. To achieve this, it is necessary to understand and classify these impacts. However, there is a shortage of studies on the life cycle assessment (LCA) of aluminum electrical cables, given the prevalent use of this product today. The objective of this work is to explore the LCA of these cables, with an emphasis on the functional unit of 1000 meters, identify their environmental impacts, and assess more sustainable production scenarios. Using the LCA for Experts software (GaBi), Cradle-to-Gate life cycles were constructed. Data collection involved structured forms and visits to the manufacturer. The analysis was based on the ReCiPe 2016 v.1.1 Midpoint method, with normalization and scenario comparisons. Key environmental impacts included freshwater consumption, fossil depletion, climate change, and human toxicity. The results highlighted the significance of the conductor material (aluminum) in environmental impacts. Weighting provided a balanced view of the most relevant impact categories, while normalized graphs illustrated variations between scenarios, identifying hotspots. It is concluded that replacing primary aluminum with secondary aluminum shows significant differences, emphasizing the need for careful considerations to promote more sustainable practices in electrical cable production.

Keywords: Life Cycle Assessment; Aluminum electrical cable; Sustainability; Environmental impacts.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Limites de sistema Cradle-to-Gate e Cradle-to-Grave.....	14
Figura 2 – Sistema do produto.....	18
Figura 3 – Representação dos fluxos do primeiro cenário.....	20
Figura 4 – Representação dos fluxos do segundo cenário.....	21
Figura 5 – Representação dos fluxos do terceiro cenário.....	21
Figura 6 – Representação dos fluxos do quarto cenário.....	22
Figura 7 – Quantificações dos impactos ambientais associados ao 1º cenário.....	23
Figura 8 – Quantificações dos impactos ambientais associados ao 2º cenário.....	23
Figura 9 – Quantificações dos impactos ambientais associados ao 3º cenário.....	24
Figura 10 – Quantificações dos impactos ambientais associados ao 4º cenário.....	24
Figura 11 – Comparação entre os cenários (segmentado por categoria de impacto).....	25
Figura 12 – Comparação entre os cenários (não segmentado).....	26

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Quantidade de materiais utilizados na confecção dos cabos (por unidade funcional).....17

Tabela 2 – Dados de funcionamento das máquinas utilizadas no processo.....17

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACV Avaliação do Ciclo de Vida

ICV Inventário do Ciclo de Vida

AICV Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida

EAA Associação Europeia de Alumínio

T&D Transmissão e Distribuição

MCCB Mudanças Climática, incluindo Carbono Biogênico

FPF Formação de Partículas Finas

DF Depleção de Combustíveis Fósseis

CAD Consumo de Água Doce

ECOTAD Ecotoxicidade de Água Doce

EAD Eutrofização de Água Doce

THC Toxicidade Humana Cancerígena

THNC Toxicidade Humana Não Cancerígena

RI Radiação Ionizante

UT Uso de Terra

ECOTM Ecotoxicidade Marinha

EM Eutrofização Marinha

DM Depleção de Metais

FOFE Formação de Ozônio Fotoquímico em Ecossistemas

FOFSH Formação de Ozônio Fotoquímico na Saúde Humana

DCOE Depleção da Camada de Ozônio Estratosférica

AT Acidificação Terrestre

ET Ecotoxicidade Terrestre

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
2 OBJETIVOS	15
3 MATERIAIS E MÉTODOS	16
4 RESULTADOS.....	18
4.1 IMPACTOS AMBIENTAIS DO CICLO DE VIDA DO CABO	18
4.2 CENÁRIOS PROPOSTOS	19
4.3 COMPARAÇÃO ENTRE OS CENÁRIOS.....	25
5 CONCLUSÕES.....	26
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	28

1 INTRODUÇÃO

A iminente revolução das conexões sem fio, como o 5G, promete introduzir novas velocidades e capacidades nos setores tecnológicos. Contudo, persistem vantagens notáveis na manutenção de conexões com fio, especialmente na indústria manufatureira. Conexões com fio garantem maior estabilidade, segurança e resistência a interferências. À medida que a tecnologia, incluindo automação, sistemas conectados e sensores inteligentes se integra à essa indústria, a importância dos cabos elétricos destaca-se. Os cabos continuam desempenhando um papel crucial na transmissão de energia e dados, já que oferecem vantagens como estabilidade de sinal, capacidade de transmissão, resistência e durabilidade. No entanto, a avaliação do ciclo de vida (ACV) desses cabos, uma metodologia para analisar impactos ambientais associados as etapas de vida do produto, permanece incerta na literatura. A ACV pode identificar impactos ambientais negativos, como emissões de carbono e consumo de recursos naturais, que poderiam ser evitados com melhorias no processo de produção.

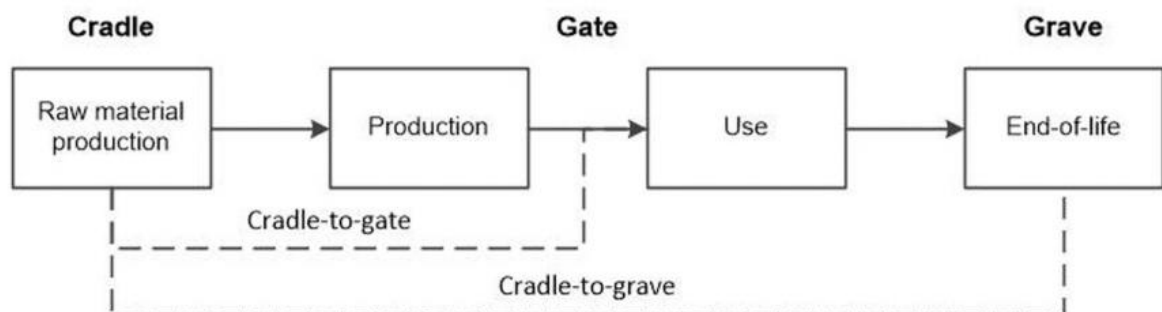
A prevalência desse produto no mercado destaca ainda mais a importância de avaliar os possíveis impactos ambientais que possam ser gerados. Segundo a *Engineering Update* (2022) para uma indústria que depende fortemente da eficiência, a importância dessa tecnologia se manifesta de maneira inequívoca. De acordo com a *Fortune Business Insights* (2022), o aumento dos investimentos em transmissão e distribuição de energia elétrica alimenta a demanda por fios e cabos. Estima-se que os investimentos em infraestruturas de Transmissão e Distribuição (T&D) crescerão para 6,8 trilhões de dólares no período compreendido entre 2014 e 2035 (WORLD ENERGY INVESTMENT, 2023). Além disso, dentro da indústria de cabos, a maioria dos condutores é tradicionalmente fabricada com cobre devido à sua alta condutividade elétrica e durabilidade. No entanto, a substituição do cobre pelo alumínio oferece a vantagem significativa de reduzir consideravelmente o peso por unidade de extensão sem comprometer substancialmente as propriedades elétricas (BRUZEK *et al.*, 2015). Porém, para garantir a condução elétrica ideal, é essencial que o alumínio utilizado em cabos apresente uma pureza superior a 99,7% (GOODWIN *et al.*, 2005).

Atualmente, sabe-se que a produção de alumínio totaliza cerca de 50 milhões de toneladas por ano (SVERDRUP; RAGNARSDOTTIR; KOCA, 2015). O aumento na demanda por alumínio na Europa, por exemplo, é amplamente sustentado pelo crescimento contínuo da reciclagem, que tem mantido uma taxa de expansão de aproximadamente 5% ao ano (BLOMBERG; SÖDERHOLM, 2009). No momento, a ACV ambiental das produções

européias de alumínio primário (produzido diretamente a partir da bauxita) e secundário (reciclado de produtos de alumínio usados) é meticolosamente definida por meio dos esforços da Associação Europeia de Alumínio (EAA) (EUROPEAN ALUMINIUM ASSOCIATION, 2008). Diversos estudos têm sido conduzidos para avaliar a sustentabilidade do alumínio reciclado, em comparação com o alumínio primário obtido por meio da mineração. Os resultados relativos aos impactos ambientais, tanto a nível global quanto local, indicam uma redução de até 90% no uso de alumínio reciclado (EUROPEAN ALUMINIUM ASSOCIATION, 2010).

O impacto do ciclo de vida do alumínio primário e secundário, portanto, está bem definido. No entanto, cenários específicos para produtos que envolvem o alumínio não estão disponíveis na literatura. Recentemente, um estudo relatou resultados que sugerem benefícios do uso do alumínio secundário em processos de reciclagem de cabos de alumínio (GRIMAUD; PERRY; LARATTE, 2018). Além disso, estudos sobre o ciclo produtivo da fibra óptica também costumam ser publicados (PINTO *et al.*, 2017). Mesmo assim, faltam evidências em relação aos impactos ambientais no ciclo produtivo *Cradle-to-Gate* de um cabo elétrico de alumínio. Este termo é empregado para delimitar o ciclo de vida do produto avaliado, que cobre desde a extração de matérias-primas até o ponto em que o produto deixa a fábrica (Figura 1). Portanto, este estudo pretende examinar o desempenho ambiental da produção de cabos elétricos de alumínio utilizando a metodologia da ACV, nos quais procedimentos e insumos fundamentais para o processo de fabricação do material.

Figura 1 – Limites de sistema *Cradle-to-Gate* e *Cradle-to-Grave*



Fonte: KOKARE, 2023

O estudo de Nunez e Jones (2016) avaliou o ciclo de vida *Cradle-to-Gate* do alumínio primário, desde a extração de bauxita até a fabricação de ânodos. Os resultados mostraram que os processos de refino e eletrólise do alumínio, especialmente o uso de eletricidade e energia térmica, são responsáveis pelas maiores contribuições para os gases de efeito estufa, com a produção de eletricidade, particularmente a partir de carvão, influenciando significativamente os impactos ambientais (NUNEZ; JONES, 2016). Embora o foco do presente estudo seja a avaliação do ciclo de vida *Cradle-to-Gate* de cabos elétricos de alumínio, que inclui o alumínio primário como parte do processo, a análise realizada por Nunez e Jones (2016) oferece uma base científica importante. A principal diferença é que o estudo atual expande a avaliação para incluir todo o ciclo de vida do cabo elétrico de alumínio unipolar, integrando as etapas que seguem a produção de alumínio primário. O cabo elétrico unipolar possui apenas um condutor elétrico, isolado por uma camada de material isolante. Este cabo é projetado para transmitir corrente elétrica em sistemas onde é necessário um único condutor, como em circuitos de baixa tensão ou em aplicações específicas. Assim, uma análise da ACV deste cabo permitirá uma melhor compreensão dos impactos ambientais gerados, considerando ainda uma lacuna de evidências na literatura.

2 OBJETIVOS

Este estudo avaliou os impactos ambientais associados aos estágios do ciclo produtivo *Cradle-to-Gate* do cabo elétrico de alumínio, identificando os fluxos de entrada e saída, relacionando perdas e materiais envolvidos nos processos e avaliando suas contribuições específicas a cada categoria de impacto considerada. Assim, o presente estudo teve como objetivo fornecer um diagnóstico do desempenho ambiental do ciclo de vida desse produto, ao mesmo tempo em que apresenta alternativas para cenários mais sustentáveis, que não comprometem a funcionalidade do cabo elétrico.

O propósito central é contribuir para uma produção mais sustentável do cabo elétrico de alumínio, promovendo informações valiosas sobre o dano ambiental ocasionado por esse produto. As etapas principais envolvidas nesse processo e que fazem parte do objetivo deste estudo, incluem definição do escopo, levantamento do inventário (Inventário do Ciclo de Vida – ICV), avaliação de impacto, interpretação dos resultados e normalização.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para a condução da avaliação do ciclo de vida do cabo elétrico de alumínio, foi adotado o método de Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida (AICV), ReCiPe 2016 v.1.1, *Midpoint*, em conformidade com as diretrizes estabelecidas pela Norma ISO 14040 (2009). O método ReCiPe é uma abordagem para AICV, desenvolvido em 2008 por uma colaboração entre RIVM, *Radboud University Nijmegen*, *Leiden University* e *PRÉ Sustainability* e utilizada para simplificar as listas extensas de resultados do inventário do ciclo de vida em um conjunto limitado de pontuações de indicadores. Através dos *Midpoints*, ou indicadores de ponto médio, que se referem a categorias de impacto ambiental que se situam no meio da cadeia causal de impacto, antes de atingir os *Endpoints* (danos finais em termos de saúde humana ou ecossistemas), foi proporcionado uma análise mais detalhada dos efeitos adversos associados às atividades humanas. Vale ressaltar que o ReCiPe é notável por sua ampla gama de categorias de impacto médio (18 categorias) e consideração de mecanismos de impacto global. (HUIJBREGTS *et al.*, 2016). O propósito é avaliar os impactos ambientais negativos associados ao ciclo de vida do cabo elétrico de alumínio e, para a coleta de dados na realização do inventário do ciclo de vida (ICV), é necessário padronizar uma unidade funcional. Neste caso, todas as informações foram coletadas em função de 1000 metros de cabo e, portanto, adotou-se a mesma unidade funcional e o fluxo de referência. A unidade funcional é o desempenho quantificado de um sistema de produto para utilização como uma unidade de referência e o fluxo de referência é a medida das saídas de processos em um dado sistema de produto, requeridas para realizar a função expressa pela unidade funcional. O sistema de produto é *Cradle-to-Gate*.

A coleta de dados essenciais para esse processo foi realizada por meio de um formulário estruturado, contendo 11 perguntas formuladas pelo autor sobre o processo de fabricação do cabo elétrico selecionado, incluindo os dados para cada etapa de produção dentro da fronteira do sistema, ou seja, do limite *Cradle-to-Gate* estabelecido anteriormente. Este formulário foi aplicado em contato direto com uma fabricante de cabos elétricos, cujo nome não será mencionado por questões de segurança e não autorização da empresa. Complementando a obtenção de dados por meio do formulário, uma visita à fábrica foi realizada, proporcionando uma visão mais detalhada e aprofundada dos processos de fabricação. A coleta de dados está representada nas Tabelas 1 e 2. O formulário incluiu 11 questões (Apêndice 1 – Protocolo de coleta de dados):

Tabela 1 – Quantidade de materiais utilizados na confecção dos cabos (por unidade funcional)

Material	Quantidade
Alumínio (kg)	25
Óleo (L)	12,5
Polímero (kg)	20
Água ionizada (L)	25
Diluyente (L)	1
Solvente (L)	1

Fonte: Elaborada pelo Autor

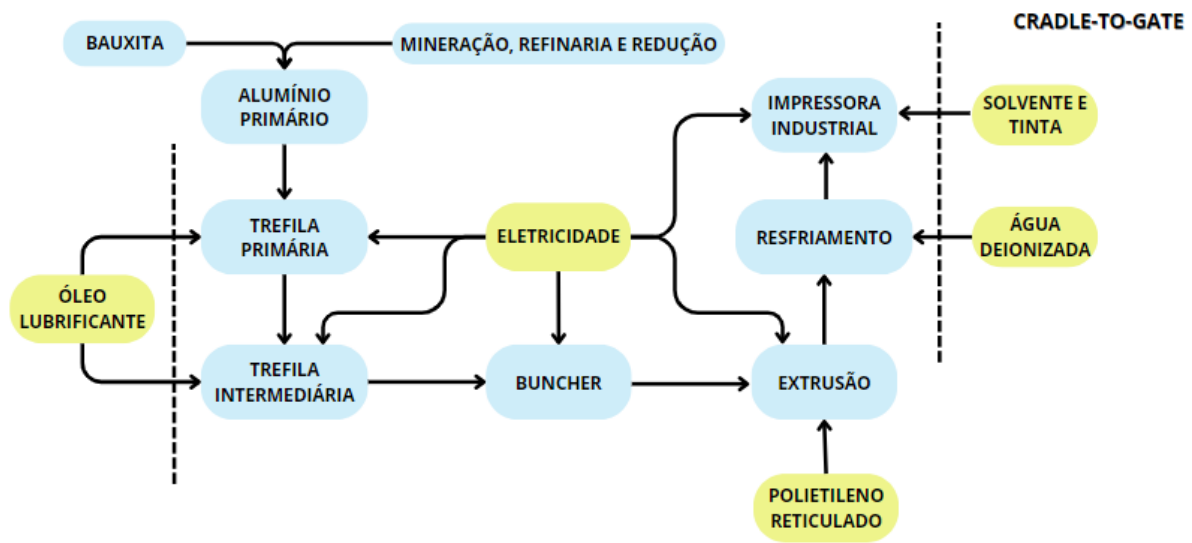
Tabela 2 – Dados de funcionamento das máquinas utilizadas no processo

Máquina	Potência (kWh)
Trefila primária	220
Trefila intermediária	148
Buncher	75
Extrusora	551
Impressora	5

Fonte: Elaborada pelo Autor

Todas as informações coletadas foram integralmente empregadas na construção do ciclo de vida por meio dos recursos disponíveis no *software LCA for experts* (GaBi), garantindo uma representação precisa e abrangente de todas as etapas envolvidas, desde a extração de matérias-primas até a fabricação do produto final. Posteriormente à montagem do ciclo de vida *Cradle-to-Gate*, três cenários adicionais foram explorados, concebidos como opções potencialmente mais sustentáveis para a produção do cabo elétrico. Estes cenários foram elaborados e analisados dentro do mesmo ambiente de *software*, proporcionando uma compreensão holística das implicações ambientais associadas a diferentes abordagens de produção. O segundo cenário foi realizado com a substituição do polietileno reticulado pelo polietileno de alta densidade, enquanto o terceiro cenário foi substituído o alumínio primário pelo alumínio secundário. Já o quarto e último cenário, ambos os processos foram substituídos concomitantemente, o alumínio primário e o polietileno reticulado pelo alumínio secundário e polietileno de alta densidade, respectivamente. O sistema de produto do ciclo produtivo realizado está representado na Figura 2.

Figura 2 – Sistema do produto



Fonte: Elaborado pelo Autor

Para uma análise mais aprofundada e uma apresentação visual clara das diferenças entre os cenários, os valores foram normalizados e posteriormente comparados através de gráficos. A normalização foi realizada dividindo o valor prático pelo fator de equivalência correspondente a cada categoria de impacto. O fator de equivalência, fornecido pelo *software*, é um valor de referência utilizado para comparar diferentes categorias de impacto, permitindo que os valores, originalmente expressos em diferentes unidades de medida, sejam convertidos em valores adimensionais. A visualização e interpretação dos resultados foram aprimoradas através da criação de gráficos utilizando ferramentas adicionais, consolidando assim as descobertas obtidas ao longo da avaliação do ciclo de vida do cabo elétrico de alumínio.

4 RESULTADOS

4.1 IMPACTOS AMBIENTAIS DO CICLO DE VIDA DO CABO

No total, foram gerados 18 resultados quantitativos de impacto relacionados a cada uma das 18 categorias de impacto avaliadas pelo método ReCiPe, nos quais foram dispostos em gráficos para visualização dos dados. Essas categorias englobam uma variedade abrangente de impactos ambientais. Os impactos considerados são os seguintes: (1) *mudanças climáticas, incluindo carbono biogênico (MCCB)*; (2) *formação de partículas finas (FPF)*; (3) *depleção*

de combustíveis fósseis (DF); (4) consumo de água doce (CAD); (5) ecotoxicidade de água doce (ECOTAD); (6) eutrofização de água doce (EAD); (7) toxicidade humana cancerígena (THC); (8) toxicidade humana não cancerígena (THNC); (9) radiação ionizante (RI); (10) Uso de terra (UT); (11) ecotoxicidade marinha (ECOTM); (12) eutrofização marinha (EM); (13) depleção de metais (DM); (14) formação de ozônio fotoquímico em ecossistemas (FOFE); (15) formação de ozônio fotoquímico na saúde humana (FOFSH); (16) depleção da camada de ozônio estratosférica (DCOE); (17) acidificação terrestre (AT) e (18) ecotoxicidade terrestre (ET).

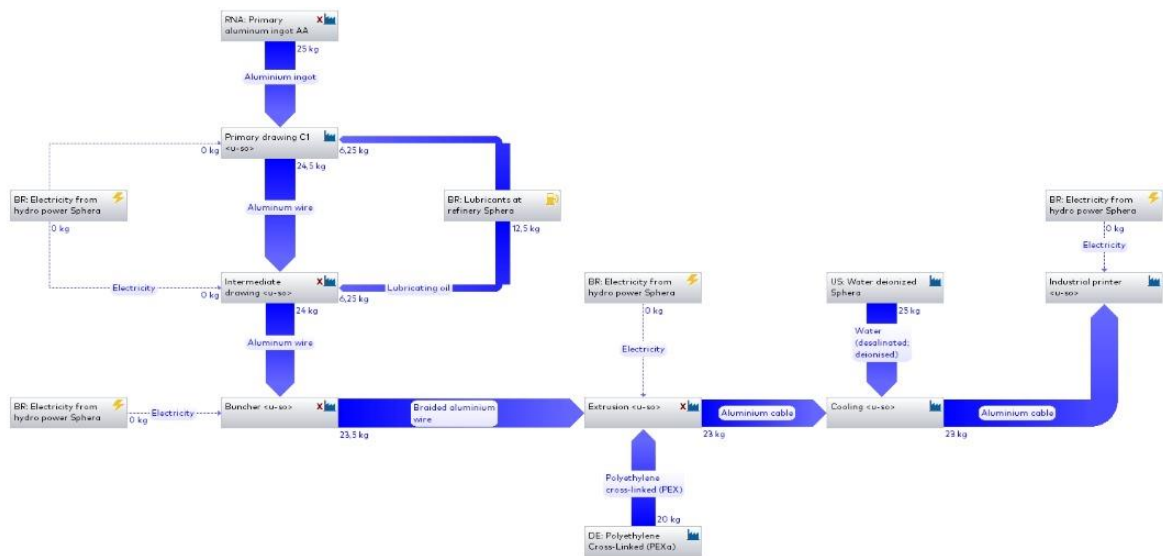
4.2 CENÁRIOS PROPOSTOS

Para criação dos cenários na produção do cabo elétrico de alumínio, foi considerada uma unidade funcional de 1000 metros. Inicialmente, a produção é conduzida por meio de dois processos de trefilação denominados primária e intermediária, respectivamente. Em cada máquina de trefilação, são empregados 6,25 litros de óleo lubrificante e 368 kWh de energia elétrica. Após os processos de trefilação, os fios resultantes passam pela máquina *Buncher*, responsável por entrelaçá-los, consumindo 75 kWh de eletricidade.

Posteriormente, o cabo segue para a extrusora, onde são adicionados 20 kg de polietileno reticulado (utilizado como cobertura do cabo) e 551 kWh de eletricidade, representando o estágio de maior consumo energético. Para o resfriamento do cabo após a formação, é utilizada água deionizada, totalizando 25 litros. Além disso, é realizado o registro do código do cabo por meio de uma impressora industrial, consumindo 3 kWh de eletricidade, 1 litro de solvente e 1 litro de tinta para cada 1000 metros de cabo.

Esses dados detalhados sobre os insumos e consumos específicos em cada etapa do processo de fabricação foram integralmente considerados na construção do ciclo de vida do cabo elétrico de alumínio, conforme mostra a Figura 3, referente ao primeiro cenário.

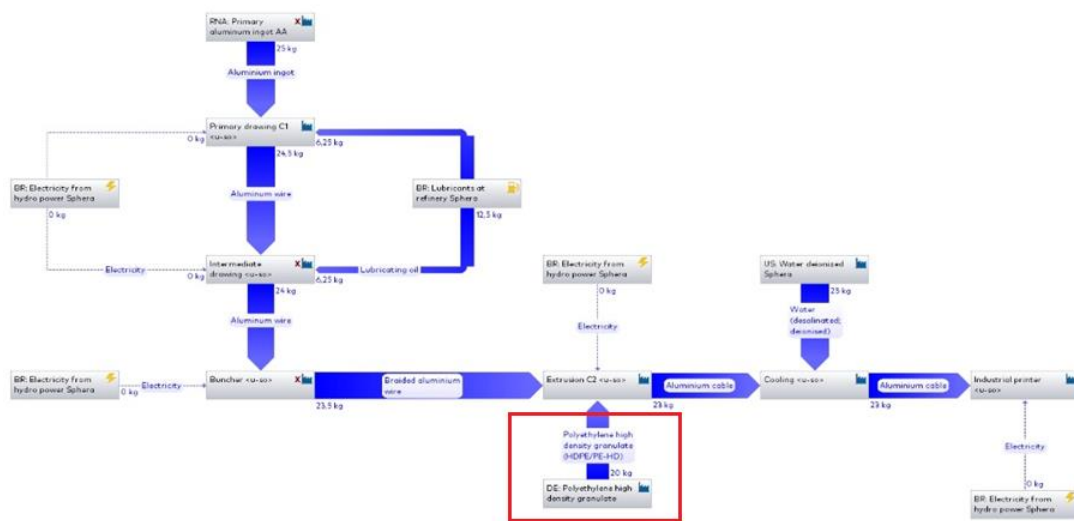
Figura 3 – Representação dos fluxos do primeiro cenário



Fonte: Elaborado pelo Autor

O primeiro cenário serviu como ponto de partida, sendo então investigados três cenários alternativos com potencial para maior sustentabilidade. Ao longo desses cenários subsequentes, processos específicos foram progressivamente substituídos. No segundo cenário, ilustrado na Figura 4, optou-se pela substituição do polietileno reticulado pelo polietileno de alta densidade, pois este último é considerado mais favorável devido à sua melhor reciclabilidade e descarte, de acordo com a fabricante. Essa estratégia visa avaliar e comparar os impactos ambientais resultantes de cada modificação, contribuindo para a identificação de práticas mais sustentáveis no ciclo de vida do produto, como será visto adiante.

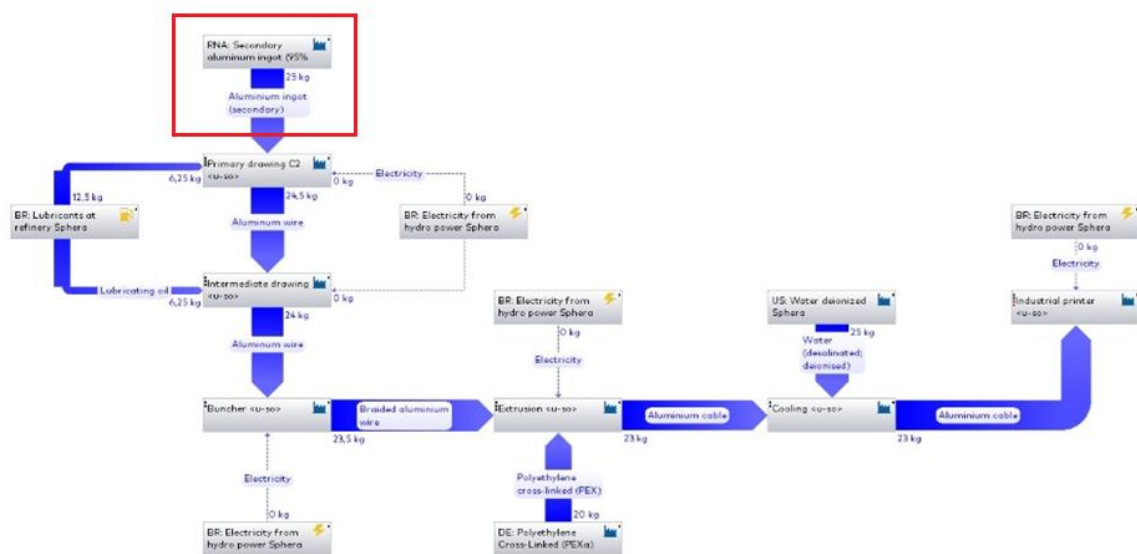
Figura 4 – Representação dos fluxos do segundo cenário



Fonte: Elaborado pelo Autor

Já o terceiro cenário, conforme ilustra a Figura 5, optou-se por substituir o alumínio primário pelo secundário, mantendo a originalidade do primeiro cenário em todos os outros aspectos, incluindo processos e fluxos de entrada e saída. Portanto, o polímero utilizado manteve-se como polietileno reticulado.

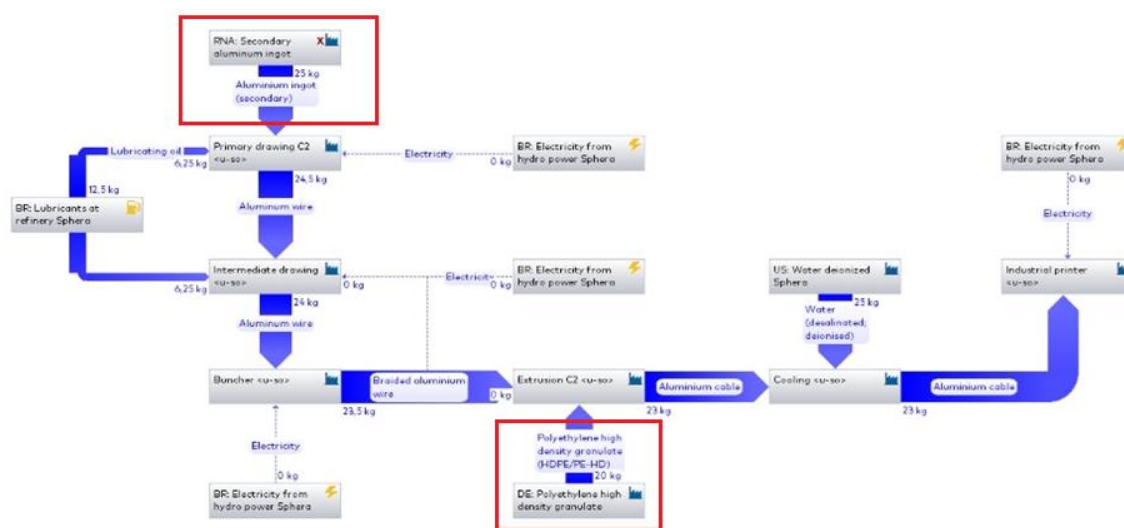
Figura 5 – Representação dos fluxos do terceiro cenário



Fonte: Elaborado pelo Autor

No quarto e último cenário realizado, os dois processos anteriormente substituídos foram utilizados dentro do mesmo ciclo produtivo, ou seja, o alumínio secundário e o polietileno de alta densidade foram utilizados. Essa mudança teve a finalidade de somar os possíveis benefícios do segundo e terceiro cenário, que podem ter ocorrido nas outras duas etapas, conforme mostra a Figura 6.

Figura 6 – Representação dos fluxos do quarto cenário



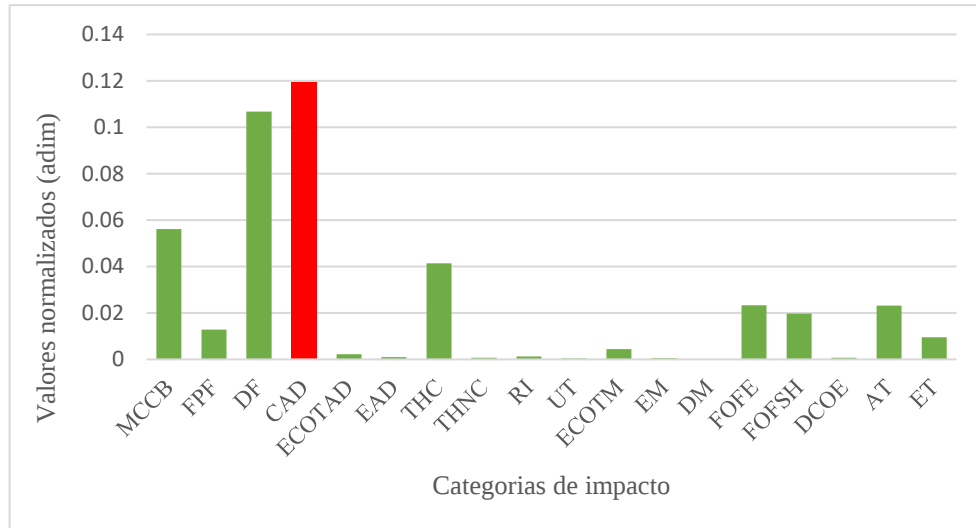
Fonte: Elaborado pelo Autor

Assim, foram gerados os gráficos como mencionado anteriormente e, após isso, foi realizada a normalização, gerando uma única pontuação numérica, ponderando cada categoria de impacto e totalizando-as. As pontuações de impacto ambiental na ACV são exibidas em unidades físicas que representam o potencial de impacto ambiental. Para isso, foi utilizado um método de normalização: dividir suas pontuações pelas pontuações de uma situação de referência, determinado pelo *Software LCA for Experts* como “fator de equivalência”.

Assim, para possibilitar a comparação, os valores foram normalizados e, após o cálculo, apresentados em tabelas correspondentes a cada cenário gerado. As Tabelas A1, A2, A3 e A4 representam os valores para os cenários 1, 2, 3 e 4, respectivamente (Apêndice 2 – Valores normalizados). Assim, foram criados os gráficos de coluna, conforme mostram as Figuras 7, 8, 9 e 10. Neles, as colunas em vermelho destacam as categorias de impacto com maiores prejuízos, sendo notável que a categoria de CAD é a mais impactada, sugerindo que o processo

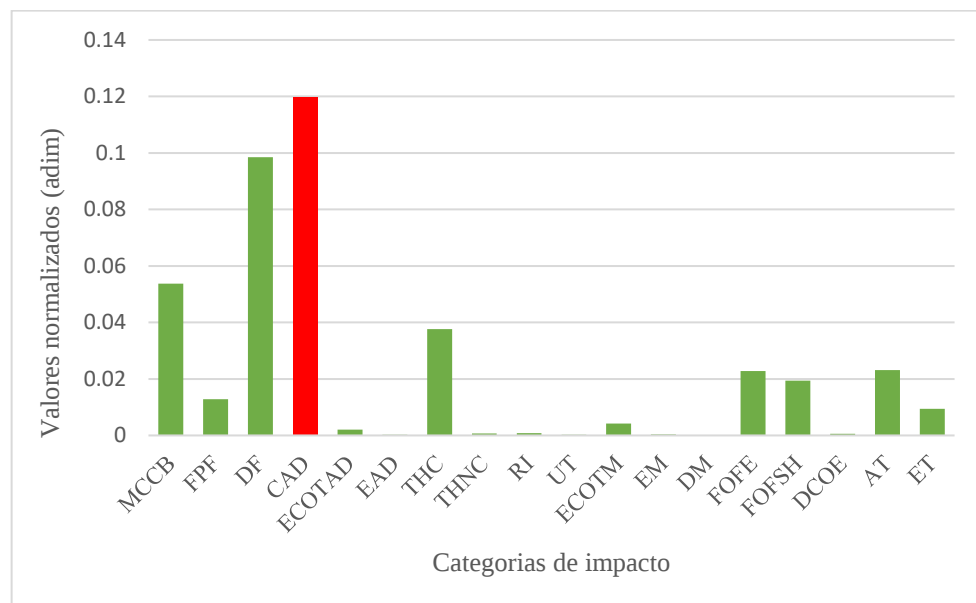
de produção do cabo elétrico unipolar de alumínio é particularmente intensivo no uso de recursos hídricos.

Figura 7 – Quantificações dos impactos ambientais associados ao 1º cenário



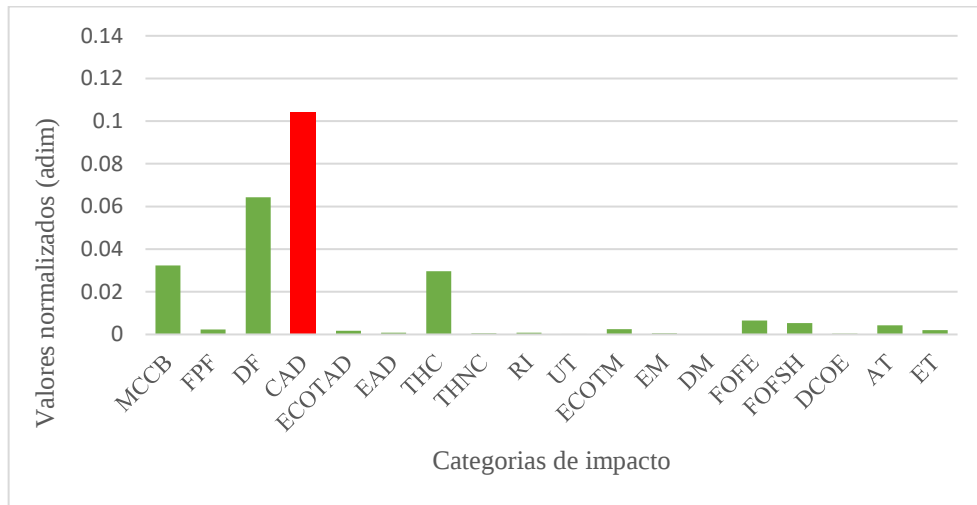
Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura 8 – Quantificações dos impactos ambientais associados ao 2º cenário



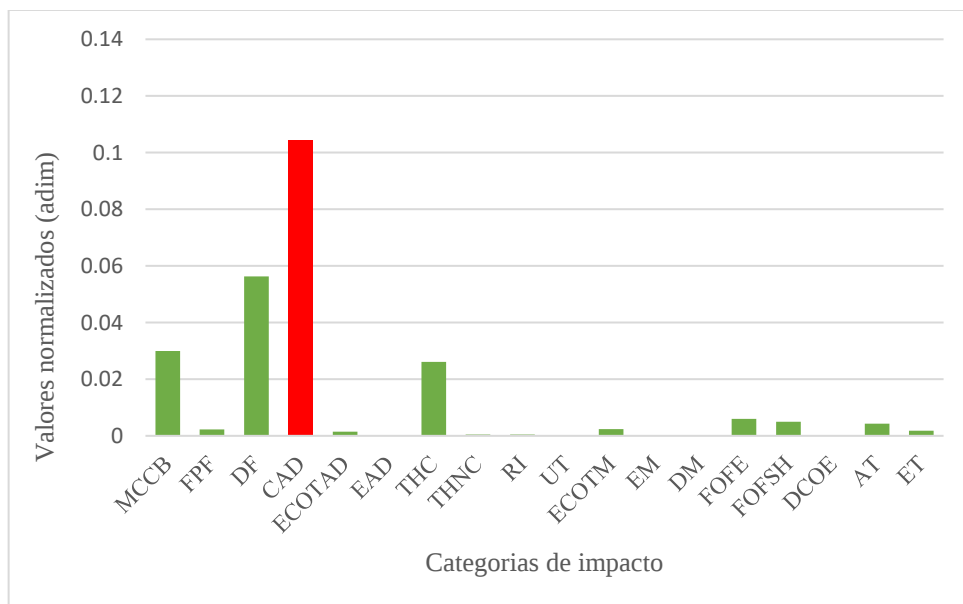
Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura 9 – Quantificações dos impactos ambientais associados ao 3º cenário



Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura 10 – Quantificações dos impactos ambientais associados ao 4º cenário



Fonte: Elaborado pelo Autor

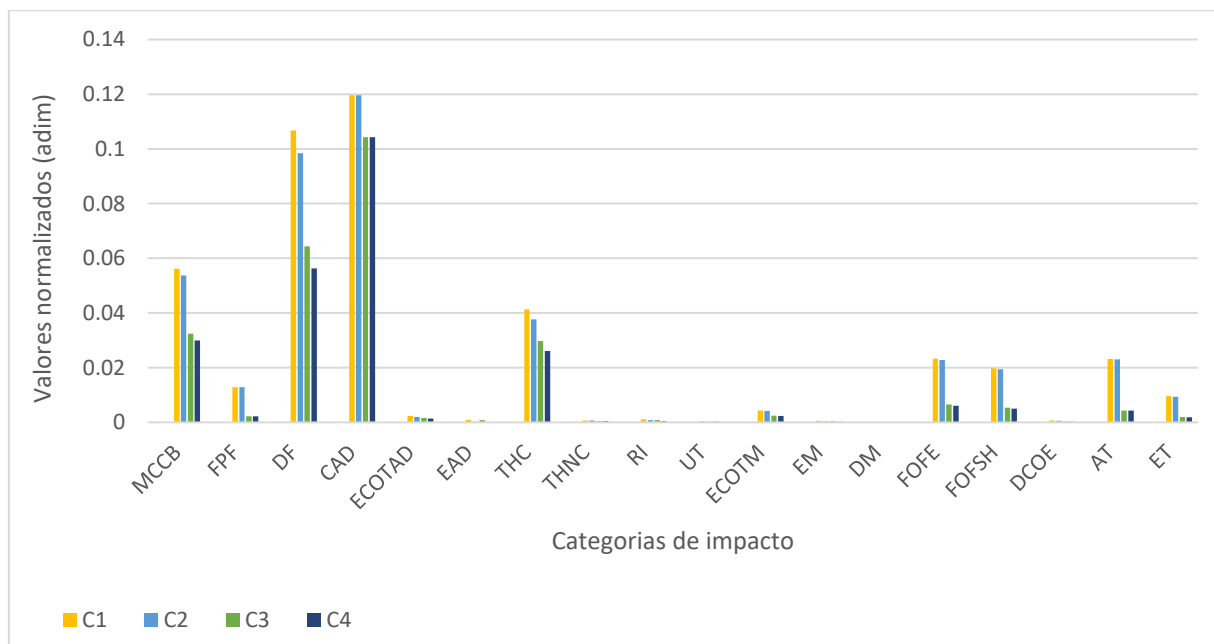
A análise dos quatro gráficos gerados a partir do balanço ambiental revela percepções importantes sobre os impactos ambientais associados ao ciclo de vida do cabo elétrico de alumínio nos diferentes cenários, conforme será detalhado a seguir na seção 4.3.

4.3 COMPARAÇÃO ENTRE OS CENÁRIOS

Os resultados dos primeiros dois cenários, nos quais o polietileno reticulado foi substituído pelo polietileno de alta densidade, exibiram semelhanças marcantes. Isso sugere que a troca do polímero não apresenta diferenças substanciais na maioria dos impactos ambientais. Embora algumas categorias, como DF, EAD, THC, RI, UT, EM e DCOE, mostrem diminuições, essas variações podem não ser significativas. No entanto, considerando o cenário de produção de cabos elétricos em larga escala, essas diferenças podem se tornar relevantes a longo prazo.

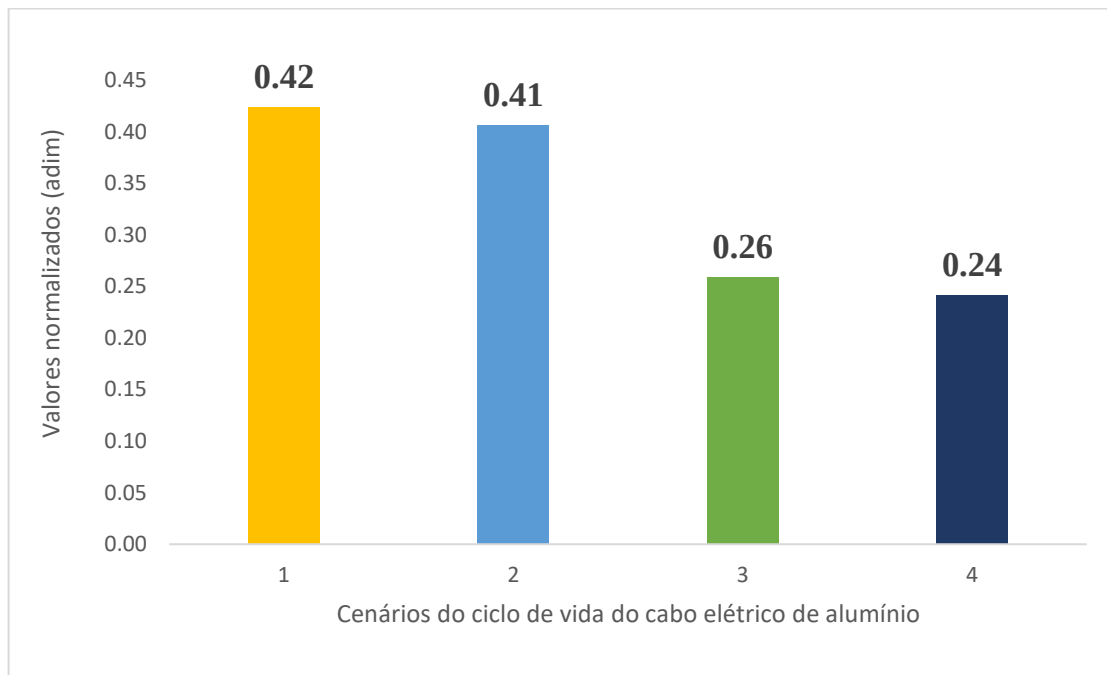
Os cenários 3 e 4, nos quais são aplicados o alumínio secundário e o alumínio secundário associado ao polietileno de alta densidade, respectivamente, apresentam diferenças modestas. Destaca-se o DF, ECOTAD, EAD e outras categorias, mas os valores permanecem relativamente pequenos. No entanto, a mudança mais significativa ocorre a partir do terceiro cenário em relação aos dois primeiros, quando há a substituição do alumínio primário pelo secundário. A Figura 11 e 12 mostram a comparação entre os quatro cenários segmentado por categoria de impacto e englobando todo o conjunto através da soma dos valores de todas as categorias, respectivamente.

Figura 11 – Comparação entre os cenários (segmentado por categoria de impacto)



Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura 12 – Comparação entre os cenários (não segmentado)



Fonte: Elaborado pelo Autor

O cenário 1, representado em amarelo em ambos os gráficos, é o pior cenário quando comparado aos outros, principalmente em relação às categorias de mudanças climáticas, depleção de fósfil, consumo de água doce e toxicidade humana (câncer). Já o cenário 4, representado em azul escuro, é o cenário produzido mais sustentável, como já mencionado. Os cenários 2 e 3 estão representados em azul claro e verde, respectivamente. Uma observação crucial é que a substancial diferença nos valores entre os cenários ocorre quando há a substituição do alumínio primário pelo secundário, ou seja, a diferença passa a ser maior quando se compara os cenários 3 e 4 com os cenários 1 e 2. Isso sugere que a fase de produção do material condutor, desde a extração da matéria-prima, representa um dos processos mais significativos em termos de impacto ambiental. Além disso, apesar das variações em outras categorias, o CAD permanece como o principal impacto ambiental, destacando sua relevância contínua mesmo diante das diferenças nos impactos globais entre os cenários.

5 CONCLUSÕES

Este trabalho mostra que os seguintes resultados foram alcançados: (1) a substituição do polietileno reticulado pelo de alta densidade não apresentou diferenças significativas nos

impactos ambientais; (2) o alumínio secundário mostrou-se menos prejudicial para o ciclo de vida do cabo elétrico em comparação com o alumínio secundário, apresentando um melhor desempenho ambiental; (3) o CAD representa o principal impacto entre as categorias avaliadas, independente das variações entre os cenários e (4) o quarto cenário, realizado com alumínio secundário e polietileno de alta densidade como principais substituição, é o cenário mais sustentável entre todos analisados.

O alumínio é um metal extremamente prevalente atualmente, sendo utilizado como principal substituto do cobre como condutor. A alta demanda de cabos elétricos, visto sua importância na indústria e empresas que exigem uma conexão rápida e eficiente, reflete a importância de analisar os impactos ambientais, assim como encontrar soluções para mitigá-los nos dias de hoje. Este trabalho traz informações substanciais a respeito do impacto ao meio ambiente gerado pelo ciclo produtivo desse produto, categorizando os impactos e enfatizando os principais processos responsáveis pelos danos ao meio ambiente. Além disso, são avaliados cenários que, ao trocar insumos e realizar mudanças simples, podem reduzir os potenciais impactos ambientais associados ao processo de produção.

Este estudo possui diversas limitações. Primeiramente, está limitado a informações de uma única empresa, porém sabe-se que existe uma grande variação entre diferentes fabricantes do produto. Em segundo lugar, este estudo não explora o potencial do cobre, o principal condutor utilizado nos cabos elétricos, sendo uma importante avaliação para o produto atualmente. Além disso, não são explorados os cabos elétricos nas suas diferentes variações, como cabos multipolares, o que envolveria a introdução de diferentes processos no ciclo produtivo. Por fim, não é abordado o ciclo de vida em sua forma mais ampla, limitando-se ao tipo *Cradle-to-Gate*.

Em resumo, pode-se concluir que a substituição do alumínio primário pelo secundário traz os melhores resultados em termos de sustentabilidade, reduzindo todos os impactos ambientais gerados, inicialmente, pelo alumínio primário. Ademais, o CAD é a categoria de impacto mais afetada e, portanto, deve-se priorizar a redução desse consumo, por exemplo através do uso de alumínio secundário, que reduziu significativamente essa categoria. Todas as informações atribuídas a este trabalho podem ser convertidas em aplicações práticas por empresas que produzem cabos elétricos unipolares de alumínio, contribuindo de maneira efetiva para o meio ambiente. Mesmo assim, são necessários mais estudos sobre o tema abordando as diferentes complexidades dos cabos elétricos, assim como uma avaliação mais ampla do ciclo de vida, incluindo a distribuição do produto e o descarte dos materiais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR ISO 14040: Gestão Ambiental – Avaliação do Ciclo de Vida – Princípios e Estrutura. Rio de Janeiro, 2009.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR ISO 14044: Gestão Ambiental – Avaliação do Ciclo de Vida – Requisitos e Orientações. Rio de Janeiro, 2009.

BLOMBERG, J.; SÖDERHOLM, P. The economics of secondary aluminium supply: An econometric analysis based on European data. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 53, n. 8, p. 455–463, 1 jun. 2009. DOI: 10.1016/j.resconrec.2009.03.001

BRUZEK, C. E.; ALLAIS, A.; DICKSON, D.; LALLOUET, N.; ALLWEINS, K.; MARZAHN, E. 7 - Superconducting DC cables to improve the efficiency of electricity transmission and distribution networks: An overview. Em: BESSEDE, J.-L. (Ed.). **Eco-Friendly Innovation in Electricity Transmission and Distribution Networks**. Oxford: Woodhead Publishing, 2015. p. 135–167. DOI: 10.1016/B978-1-78242-010-1.00007-0

Cables & Accessories Market Size, Industry Share | Growth 2030. Fortune Business Insights, 2023. Disponível em: <https://www.fortunebusinessinsights.com/industry-reports/cables-accessories-market-101077>. Acesso em: 2 nov. 2023.

EUROPEAN ALUMINIUM ASSOCIATION. Environmental profile report for the European aluminium industry. **Life Cycle Inventory data for aluminium production and transformation processes in Europe**, 2008.

EUROPEAN ALUMINIUM ASSOCIATION. **Sustainability of the European aluminium industry**, 2010.

GOODWIN, F. et al. **Springer Handbook of Condensed Matter and Materials Data**. Springer Handbooks. Berlin, Heidelberg: Springer, p. 161–430, 2005. DOI: 10.1007/3-540-30437-1_5.

HUIJBREGTS, M. A. J.; STEINMANN, Z. J. N.; ELSHOUT, P. M. F.; STAM, G.; VERONES, F.; VIEIRA, M.; ZIJP, M.; HOLLANDER, A.; ZELM, R. V. ReCiPe2016: a harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level. **Int J Life Cycle Assess**, v. 22, p. 138–147, 2017. DOI: 10.1007/s11367-016-1246-y

KOKARE, S.; OLIVEIRA, J. P.; GODINA, R. Life cycle assessment of additive manufacturing processes: A review. **Journal of Manufacturing Systems**, v. 68, p. 536–559, 2023. DOI: 10.1016/j.jmsy.2023.05.007.

NUNEZ, P.; JONES, S. Cradle to gate: life cycle impact of primary aluminium production. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 21, n. 11, p. 1594–1604, 1 nov. 2016. DOI: 10.1007/s11367-015-1003-7.

PINTO, Julian T. M.; AMARAL, Karen J.; HARTARD, Susanne; JANISSEK, Paulo R.; HELLING, Klaus. Reducing the environmental impacts of vitreous optical fiber production – A Life Cycle Impact Assessment. **Journal of Cleaner Production**, v. 165, p. 762–776, 2017.

DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.07.141

SVERDRUP, H. U.; RAGNARSDOTTIR, K. V.; KOCA, D. Aluminium for the future: Modelling the global production, market supply, demand, price and long term development of the global reserves. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 103, p. 139–154, 1 out. 2015. DOI: 10.1016/j.resconrec.2015.06.008.

The Role of Cables in the Technological Make-Over of the Manufacturing Industry. Engineering Update, 2022. Disponível em: <https://engineering-update.co.uk/2022/07/25/the-role-of-cables-in-the-technological-make-over-of-the-manufacturing-industry-engineering-cables-technology-manufacturingindustry/>. Acesso em: 2 nov. 2023

Wires and Cables Market Size, Growth & Share | Report [2029]. Fortune Business Insights, 2022. Disponível em: <https://www.fortunebusinessinsights.com/wires-and-cables-market-103322>. Acesso em: 2 nov. 2023.

World Energy Investment 2022 – Analysis. International Energy Agency, 2022. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/world-energy-investment-2022>. Acesso em: 2 nov. 2023.

Apêndice 1 – Protocolo de coleta de dados

- A.** Qual é a quantidade de alumínio utilizado para fabricação de 1000 metros de cabo no vergalhão?
- B.** Na primeira etapa, denominada trefilação, que consiste em diminuir o diâmetro e aumentar o comprimento do material, existem processos antes da passagem do material pelas máquinas de trefila?
- C.** Qual é o lubrificante utilizado para a passagem do material nas trefilas? Qual é a quantidade utilizada?
- D.** Qual é a potência da máquina de trefila e quanto tempo demora o processo de trefilação (primária e intermediária)? No total, qual é a sobra (fluxo de saída) no final do processo? A perda desse processo é reutilizável ou descartada?
- E.** A etapa de encordoamento consiste em gerar o cabo (sem isolamento ainda) através dos fios derivados da trefila intermediária. Para o caso do cabo unipolar, quantos fios são gerados? Qual é a quantidade de alumínio, em termos de massa, que saem dessa etapa?
- F.** Na etapa de encordoamento, qual é a potência e o tempo que o Buncher leva para formação do cabo? Quais são os fluxos de entrada (além do condutor) e saída (sobra) desse processo? Antes dele, há algum processo que ocorre (subprocesso) após a trefilação?
- G.** Na etapa de extrusão, ocorre o encapamento do condutor com o material isolante utilizado, nesse caso, para o cabo unipolar estudado trata-se do polietileno reticulado (XLPE). Dessa maneira, qual é a quantidade desse material utilizado no processo?
- H.** Após a injeção do polímero, no qual ocorre um aumento na temperatura, há o resfriamento do material através da água? Qual é a quantidade de água utilizada?
- I.** Ainda nessa etapa, para a coloração do material, utiliza-se pigmentos (de origem orgânica ou inorgânica) compatível com o polímero a ser aplicado? Se sim, é acrescentado algum aditivo para aprimorar ou criar propriedades além de contribuir para uma melhor distribuição e dispersão? Qual é a quantidade de pigmentos e aditivos utilizados?
- J.** Ao final da extrusão, em termos de massa, o que sobra (fluxo de saída), além do cabo? É reciclável? Qual é o tempo da máquina extrusora para realizar o processo? Qual é a potência?

K. Por fim, há a etapa de impressão, no qual grava os dados do cabo. Sabe-se que o registro é realizado a cada um metro, portanto pensando no cabo estudado e no comprimento dele, qual é a quantidade de tinta utilizada nesse processo e quanto tempo leva para realizá-lo?

Apêndice 2 – Valores normalizados

Tabela A1 – Normalização do 1º cenário.

Categorias de Impacto	Equivalência	Valor Prático	Normalização
MCCB	7990.40	449	0,056192377
FPF	25.56	0.329	0,012866844
DF	983.27	105	0,106785732
CAD	266.63	31.9	0,119637295
ECOTAD	25.17	0.0573	0,002276094
EAD	0.649	0.000602	0,000926313
THC	10.29	0.426	0,041366025
THNC	31251.84	21.6	0,000691159
RI	479.91	0.58	0,001208541
UT	6167.48	2.82	0,000457237
ECOTM	43.44	0.19	0,004373563
EM	4.61	0.0029	0,000628007
DM	120051.20	1.28	1,06621E-05
FOFE	17.74	0.413	0,023268486
FOFSH	20.56	0.407	0,019788543
DCOE	0.06	0.0000445	0,000741543
AT	40.98	0.95	0,023181749
ET	15200.31	145	0,009539279

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Tabela A2 – Normalização do 2º cenário.

Categorias de Impacto	Equivalência	Valor Prático	Normalização
MCCB	7990.40	429	0,053689376
FPF	25.56	0.328	0,012827735
DF	983.27	96.8	0,098446275
CAD	266.63	31.9	0,119637295
ECOTAD	25.17	0.0513	0,00203776
EAD	0.649	0.000144	0,000221577
THC	10.29	0.388	0,037676098
THNC	31251.84	21.3	0,00068156
RI	479.91	0.413	0,000860565
UT	6167.48	1.6	0,000259425
ECOTM	43.44	0.185	0,004258469
EM	4.61	0.00165	0,000357314
DM	120051.20	1.22	1,01623E-05
FOFE	17.74	0.405	0,022817765
FOFSH	20.56	0.399	0,019399579
DCOE	0.06	0.0000341	0,000568239
AT	40.98	0.947	0,023108543
ET	15200.31	143	0,009407702

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Tabela A3 – Normalização do 3º cenário.

Categorias de Impacto	Equivalência	Valor Prático	Normalização
MCCB	7990.40	259	0,032413866
FPF	25.56	0.0577	0,002256586
DF	983.27	63.3	0,064376542
CAD	266.63	27.8	0,104260715
ECOTAD	25.17	0.0421	0,001672314
EAD	0.649	0.00056	0,000861686
THC	10.29	0.306	0,029713623
THNC	31251.84	14.3	0,000457573
RI	479.91	0.393	0,000818891
UT	6167.48	1.83	0,000296718
ECOTM	43.44	0.107	0,002463006
EM	4.61	0.00212	0,000459095
DM	120051.20	0.282	2,349E-06
FOFE	17.74	0.116	0,006535459
FOFSH	20.56	0.111	0,005396875
DCOE	0.06	0.0000216	0,00035994
AT	40.98	0.178	0,004343528
ET	15200.31	30.7	0,002019696

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Tabela A4 – Normalização do 4º cenário.

Categorias de Impacto	Equivalência	Valor Prático	Normalização
MCCB	<i>7990.40</i>	<i>239</i>	<i>0,029910864</i>
FPF	<i>25.56</i>	<i>0.0566</i>	<i>0,002213567</i>
DF	<i>983.27</i>	<i>55.3</i>	<i>0,056240486</i>
CAD	<i>266.63</i>	<i>27.8</i>	<i>0,104260715</i>
ECOTAD	<i>25.17</i>	<i>0.0362</i>	<i>0,001437951</i>
EAD	<i>0.649</i>	<i>0.000102</i>	<i>0,00015695</i>
THC	<i>10.29</i>	<i>0.269</i>	<i>0,0261208</i>
THNC	<i>31251.84</i>	<i>13.9</i>	<i>0,000444774</i>
RI	<i>479.91</i>	<i>0.227</i>	<i>0,000472998</i>
UT	<i>6167.48</i>	<i>0.618</i>	<i>0,000100203</i>
ECOTM	<i>43.44</i>	<i>0.102</i>	<i>0,002347913</i>
EM	<i>4.61</i>	<i>0.000873</i>	<i>0,000189052</i>
DM	<i>120051.20</i>	<i>0.217</i>	<i>1,80756E-06</i>
FOFE	<i>17.74</i>	<i>0.107</i>	<i>0,006028397</i>
FOFSH	<i>20.56</i>	<i>0.103</i>	<i>0,005007911</i>
DCOE	<i>0.06</i>	<i>0.0000116</i>	<i>0,000193301</i>
AT	<i>40.98</i>	<i>0.175</i>	<i>0,004270322</i>
ET	<i>15200.31</i>	<i>28</i>	<i>0,001842068</i>

Fonte: Elaborado pelo Autor.