



Instituto de Tecnologia

RELATÓRIO FINAL DE PROJETO

Avaliação de ciclo de vida “berço ao túmulo”

COMPUTADOR POSITIVO MASTER C8400 MINIPRO

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	4
LISTA DE TABELAS.....	6
SOBRE O FIT	7
SOBRE A POSITIVO TECNOLOGIA	7
EQUIPE RESPONSÁVEL PELO ESTUDO	8
SUMÁRIO EXECUTIVO.....	9
1. DEFINIÇÃO DE OBJETIVO E ESCOPO	11
I. Objetivo	11
II. Escopo.....	12
a) Função, Unidade Funcional e Fluxo de Referência	12
b) Sistema de produto e fronteira	13
c) Procedimentos de alocação	13
d) Métodos e categorias de AICV	15
e) Critérios de corte	17
f) Pressupostos e limitações	17
g) Qualidade dos dados	18
h) Tipo de revisão crítica.....	19
2. INVENTÁRIO DO CICLO DE VIDA.....	20
I. Coleta de dados	20
II. Hipóteses e premissas	21
III. Processamento dos dados de produção	22
IV. Fase de uso	24
V. Fases de transporte	24
VI. Fase de fim de vida (End-of-life EoL)	25
3. AVALIAÇÃO DE IMPACTO DO CICLO DE VIDA.....	27
I. Resultados	27
a) Aquecimento Global (Global warming)	29
b) Depleção de Ozônio Estratosférico (<i>Stratospheric ozone depletion</i>).....	31
c) Acidificação Terrestre (<i>Terrestrial acidification</i>)	33
d) Eutrofização aquática (Freshwater eutrophication)	35

e)	Uso de terra (<i>Land use</i>)	37
f)	Escassez de recursos minerais (<i>Mineral resource scarcity</i>).....	39
g)	Escassez de recursos fósseis (<i>Fossil resource scarcity</i>).....	41
h)	Consumo de água (<i>Water consumption</i>).....	43
i)	Demanda Cumulativa de Energia (<i>Cumulative Energy Demand (CED)</i>) .	45
j)	Toxicidade Humana – câncerígeno (<i>Human toxicity, cancer</i>)	47
k)	Toxicidade Humana – não-câncerígeno (<i>Human toxicity, non-cancer</i>) .	49
l)	Ecotoxicidade aquática (<i>Freshwater ecotoxicity</i>).....	51
II.	Validação dos dados	53
a)	Análise de incerteza.....	53
III.	Análises de sensibilidade	54
a)	Uso de monitor LCD.....	55
b)	Manutenção / extensão da vida útil.....	57
4.	INTERPRETAÇÃO E CONCLUSÕES	60
5.	REFERÊNCIAS	62
	APÊNDICE I – Memorial de cálculo.....	64
	APÊNDICE II – Montagem da AICV no software SimaPro.....	65

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fluxograma do sistema de produto	14
Figura 2 - Contribuição das fases do ciclo de vida em cada categoria de impacto.	28
Figura 3 - Análise de contribuição da produção das matérias-primas - Aquecimento Global.....	30
Figura 4 - Análise de contribuição por fases do ciclo de vida - Aquecimento Global	30
Figura 5 - Análise de contribuição da produção das matérias-primas - Depleção de ozônio estratosférico.....	32
Figura 6 - Análise de contribuição por fases do ciclo de vida - Depleção de ozônio estratosférico.....	32
Figura 7 - Análise de contribuição da produção das matérias-primas - Acidificação terrestre.....	34
Figura 8 - Análise de contribuição por fases do ciclo de vida - Acidificação Terrestre	34
Figura 9 - Análise de contribuição da produção das matérias-primas - Eutrofização aquática	36
Figura 10 - Análise de contribuição por fases do ciclo de vida - Eutrofização aquática	36
Figura 11 - Análise de contribuição da produção das matérias-primas - Uso de terra	38
Figura 12 - Análise de contribuição por fases do ciclo de vida – Uso de terra	38
Figura 13 - Análise de contribuição da produção das matérias-primas - Escassez de recursos minerais	40
Figura 14 - Análise de contribuição por fases do ciclo de vida – Escassez de recursos minerais	40
Figura 15 - Análise de contribuição da produção das matérias-primas - Escassez de recursos fósseis.....	42
Figura 16 - Análise de contribuição por fases do ciclo de vida - Escassez de recursos fósseis.	42
Figura 17 - Análise de contribuição da produção das matérias-primas - Consumo de água	44
Figura 18 - Análise de contribuição por fases do ciclo de vida - Consumo de água	44
Figura 19 - Análise de contribuição da produção das matérias-primas - Demanda cumulativa de energia	46
Figura 20 - Análise de contribuição por fases do ciclo de vida - Demanda cumulativa de energia	46
Figura 21 - Análise de contribuição da produção das matérias-primas - Toxicidade humana – cancerígeno	48
Figura 22 - Análise de contribuição por fases do ciclo de vida - Toxicidade humana – cancerígeno	48

Figura 23 - Análise de contribuição da produção das matérias-primas - Toxicidade humana não-cancerígeno	50
Figura 24 - Análise de contribuição por fases do ciclo de vida - Toxicidade humana – não cancerígeno	50
Figura 25 - Análise de contribuição da produção das matérias-primas - Ecotoxicidade aquática.....	52
Figura 26 - Análise de contribuição por fases do ciclo de vida – Ecotoxicidade aquática	52
Figura 27 - Resultado comparativo da análise de sensibilidade - uso com monitor LCD.....	57
Figura 28 - Resultado comparativo da análise de sensibilidade – extensão da vida útil.....	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características do sistema de produto	11
Tabela 2 - Função, unidade funcional e fluxo de referência	12
Tabela 3 - Categorias de componentes do produto.....	13
Tabela 4 – Categorias de impacto avaliadas	16
Tabela 5 - Fonte dos dados coletados	18
Tabela 6 - Inventário mássico do Master C8400 MiniPro	20
Tabela 7 - Unidades produzidas do desktop MiniPro na planta de Ilhéus-BA em 2024.	22
Tabela 8 - Produção total de produtos na planta de Ilhéus-BA em 2024.	22
Tabela 9 - Tempo de produção e porcentagem de tempo despendido em cada categoria de produto.	23
Tabela 10 - Resultado de ensaio de eficiência energética	24
Tabela 11 - Dados adaptados de transporte upstream e downstream.....	25
Tabela 12 - Datasets utilizados em cada modal de transporte	25
Tabela 13 - Dados utilizados para fase de fim de vida	26
Tabela 14 - Resultados nas 12 categorias de impacto	27
Tabela 15 - Resultados da simulação de Monte Carlo	54
Tabela 16 - Dados utilizados para fase de transporte no cenário com uso de monitor LCD.....	56
Tabela 17 - Dados utilizados para fase de uso no cenário com uso de monitor LCD	56
Tabela 18 - Resultados dos impactos ambientais - cenário uso de monitor	56
Tabela 19 - Dados adaptados utilizados na análise de sensibilidade - extensão vida útil.....	58
Tabela 20 - Resultados dos impactos ambientais - cenário extensão de vida útil..	58

SOBRE O FIT

O FIT (Flextronics Instituto de Tecnologia) nasceu em 2003 e é credenciado pelo CATI (Comitê da Área de Tecnologia da Informação e Comunicação) do Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações (MCTIC) e pelo CAPDA (Comitê das atividades de Pesquisa e Desenvolvimento na Amazônia) do Ministério da Economia.

No FIT: constrói-se prosperidade para o homem e o meio ambiente através da tecnologia, inovação e capacitação de pessoas. E a visão é desafiadora: estar entre os líderes globais no desenvolvimento e aplicação de tecnologias em diversas áreas de atuação.

FIT é pautado pelos seguintes valores:

- Ajudar um ao outro na escolha do melhor caminho, sempre;
- Compartilhar conhecimento para melhorar o time;
- Mover rápido com disciplina, respeito e propósito;
- Evitar errar, mas serem ágeis e transparentes para admitir e transformar os erros em conhecimento.

O FIT é dividido em seis centros de excelência: Indústria 4.0, Transformação Digital, Economia Circular, Energias Renováveis, Conectividade e Desenvolvimento Técnico. O Centro de Excelência em Economia Circular do FIT oferece soluções inovadoras para modelos circulares e sustentáveis, promovendo a eficiência no uso de recursos, a redução de resíduos e custos, bem como a melhoria da qualidade. Além disso, o centro facilita a implementação de práticas e modelos regenerativos, buscando restaurar e revitalizar os ecossistemas.

SOBRE A POSITIVO TECNOLOGIA

A Positivo Tecnologia é uma empresa brasileira de tecnologia que desenvolve, fabrica e comercializa computadores, celulares, tablets, dispositivos para casas e escritórios inteligentes, servidores e demais soluções para infraestrutura de TI, além de máquinas de pagamento e tecnologias educacionais. Também oferece serviços gerenciados de TI. O conjunto de produtos e serviços é voltado para consumidores finais, empresas, condomínios residenciais, escolas e instituições públicas. A Companhia foi fundada em 1989, possui sede administrativa em Curitiba (PR), fábricas em Ilhéus (BA) e Manaus (AM), além de presença na Argentina, China e Taiwan. O portfólio de marcas e negócios é composto por [Positivo](#), [Positivo Casa Inteligente](#), [Positivo Servers & Solutions](#), [PositivoSEG](#), [Positivo S+](#), [VAIO](#), [Infinix](#) e [Educativo - Ecossistema de Tecnologia e Inovação](#).

Informações adicionais podem ser obtidas em www.positivotecnologia.com.br. Para saber as últimas notícias sobre a Positivo Tecnologia, visite [Sala de Imprensa](#), assim como os perfis da Companhia no [LinkedIn](#), [Facebook](#) e [Instagram](#).

EQUIPE RESPONSÁVEL PELO ESTUDO

☒ Renan de Azevedo Ruffo

- *Engenheiro Ambiental*
- *Avaliação do Ciclo de Vida*
- *Função: responsável técnico da modelagem e elaboração do relatório.*
<https://www.linkedin.com/in/renanruffo/>

☒ Efigênia Rossi

- *Dra. em Engenharia Ambiental*
- *Avaliação do Ciclo de Vida*
- *Função: apoio técnico na modelagem SimaPro*
<https://www.linkedin.com/in/efig%C3%AAnia-rossi-36b30178/>

☒ Eline Aguiar

- *Engenheira Ambiental*
- *Avaliação do Ciclo de Vida*
- *Função: apoio técnico e revisão de texto*
<https://www.linkedin.com/in/elineaguiarmeioambiente/>

☒ Vanessa Kerolin Araujo Meireles

- *Dra. em Sustentabilidade*
- *Pesquisadora em ESG*
- *Função: revisão de texto*
<https://www.linkedin.com/vanessameireles>

☒ Josué Graton

- *Gerente do Centro de Excelência em Responsabilidade Social e Economia Circular*
- *Economia Circular*
- *Função: relacionamento*
<https://www.linkedin.com/in/josu%C3%A9-graton-494ab964/>

SUMÁRIO EXECUTIVO

O Pensamento do Ciclo de Vida é uma abordagem que analisa todos os estágios da vida de um produto ou serviço — da extração de matérias-primas à produção, distribuição, uso e descarte final. O objetivo é compreender os impactos ambientais em cada fase, evitando a transferência de problemas entre elas. Por exemplo, reduzir o consumo de energia na produção pode levar a um aumento no uso de recursos durante o descarte, o que também é prejudicial.

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é um método científico que aplica o Pensamento do Ciclo de Vida com foco na perspectiva ambiental. Normatizada pelas ISO 14040 e 14044, a ACV é estruturada em quatro etapas: Definição do Objetivo e Escopo, Análise de Inventário, Avaliação de Impacto e Interpretação.

A primeira etapa, Definição de Objetivo e Escopo, estabelece as bases do estudo, garantindo uma análise clara e focada. A Definição de Objetivo responde ao "porquê" e "para que" da ACV, enquanto o Escopo determina o "como", incluindo o que será medido e os limites do estudo. Essas etapas são essenciais para garantir a consistência e a utilidade dos resultados da ACV.

Na Análise de Inventário, são coletados dados sobre entradas (energia, água, materiais) e saídas (emissões, resíduos) de cada etapa do ciclo de vida.

A Avaliação de Impacto caracteriza os potenciais impactos ambientais, convertendo os dados de inventário em indicadores como mudança climática, poluição da água e do ar, e esgotamento de recursos.

Por fim, a Interpretação analisa os dados e impactos, extraindo conclusões sobre a validade dos dados e premissas levantadas, em consonância com o objetivo e escopo definidos para o estudo.

No Brasil, a ACV tem se fortalecido academicamente, com um aumento significativo em pesquisas e profissionais envolvidos. Indústrias líderes em inovação ambiental adotam essa ferramenta para fundamentar decisões sobre processos e produtos, além de realizar avaliações comparativas de desempenho ambiental.

A implementação da ACV em declarações e certificações ambientais confere maior confiabilidade e transparência ao consumidor, promovendo escolhas mais conscientes e sustentáveis. Além de suas aplicações práticas, a Avaliação do Ciclo de Vida promove uma mudança de paradigma na forma de pensar sobre consumo e produção, ampliando a perspectiva para incluir as consequências ambientais das fases iniciais e finais dos produtos.

Esse entendimento é crucial em um cenário global onde as questões ambientais são cada vez mais relevantes. A ACV identifica oportunidades de otimização, desde a escolha de materiais sustentáveis até o redesenho de processos que minimizam resíduos e emissões. Empresas que adotam essa abordagem se alinham às melhores práticas de sustentabilidade e podem obter vantagens competitivas. Os consumidores, por sua vez, tornam-se mais

informados sobre a pegada ecológica dos produtos, facilitando decisões que refletem seus valores.

O envolvimento de instituições educacionais é igualmente relevante. Universidades e institutos de pesquisa têm se esforçado para capacitar novos profissionais em ACV, promovendo uma formação conectada aos desafios ambientais contemporâneos. Esse investimento na educação é fundamental para criar uma cultura de inovação sustentável em todos os setores da sociedade.

Em resposta à crescente preocupação da sociedade com a sustentabilidade, o FIT Instituto de Tecnologia da Amazônia tem integrado o Pensamento do Ciclo de Vida em seu portfólio de soluções, visando a comparação, desenvolvimento e validação de novas opções para seus clientes.

Neste estudo foi considerado o computador *desktop* da marca Positivo modelo Master C8400 MiniPro, de acordo com as seguintes especificações:

1. **Master C8400 MiniPro:** Computador *desktop* compacto, incluso dispositivo, teclado, mouse e embalagens. Massa total: 2326,13g | Fabricação: Brasil | Fonte de energia: Eletricidade | Uso: Brasil.

Este documento se apresenta de acordo com os procedimentos metodológicos estabelecidos nas normas ABNT NBR ISO 14040 (ABNT NBR:ISO, 2014a)¹ e ABNT NBR ISO 14044 (ABNT NBR:ISO, 2014b)². O escopo de um estudo de ACV deve assegurar que a abrangência, profundidade e detalhamento sejam compatíveis e suficientes para atender o objetivo declaradamente firmado.

É importante ressaltar que a iteratividade do método ACV permite redefinições e reavaliações dos objetivos e escopo do estudo, à medida que os dados e informações são coletados, avaliados e interpretados.

¹ ABNT NBR:ISO, Associação Brasileira de Normas Técnicas. ABNT NBR:ISO 14040 - Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura. Rio de Janeiro - RJ: [s. n.], 2014. Disponível em: www.abnt.org.br.

² ABNT NBR:ISO, Associação Brasileira de Normas Técnicas. ABNT NBR:ISO 14044 - Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Requisitos e orientações. Rio de Janeiro - RJ: [s. n.], 2014. Disponível em: www.abnt.org.br.

1. DEFINIÇÃO DE OBJETIVO E ESCOPO

I. Objetivo

A Definição do Objetivo e Escopo é a etapa inicial de um estudo de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV). De acordo com a NBR ISO 14040, essa fase deve ser clara e objetiva, levando em conta as expectativas das partes interessadas e alinhando-se aos princípios fundamentais da ACV.

O presente estudo teve como objetivo avaliar o desempenho ambiental do ciclo de vida do berço ao túmulo do *desktop* modelo Master C8400 MiniPro, produzido pela Positivo Tecnologia.

O sistema de produto do modelo C8400 comporta: uma CPU (*desktop*), cabo de alimentação, mouse, teclado e embalagens. São diversas as possibilidades de componentes do produto, no que tange a capacidade de memória, armazenamento, processamento e alimentação de energia. A tabela abaixo traz as principais especificações que definem o sistema do produto aqui analisado.

Tabela 1 - Características do sistema de produto

Master C8400 MiniPro	
Imagem	
Tamanho de tela (diagonal)	N/A
Peso	1,54kg
Tamanho	34 x 178 x 178 mm ALP
Capacidade da bateria	N/A
Memória	16 GB DDR5
Processador	Intel Core i5 13500T 13rd Gen
Armazenamento	512 GB SSD Gen4
Outros componentes de hardware	Mouse Teclado
Tempo de vida útil	5 anos

- a) **Aplicação pretendida:** Avaliar o desempenho ambiental do ciclo de vida do berço ao túmulo do *desktop* modelo Master C8400 MiniPro. Esta avaliação de ciclo de vida estudou apenas os impactos ambientais do cenário base, não se propondo a estudar cenários de melhoria.
- b) **Razões para a execução do estudo:** O estudo foi realizado com a intenção de compreender principalmente a pegada de carbono do produto, além de analisar outras 11 categorias de impacto ambiental. Identificar as etapas do ciclo de vida do produto que mais contribuem para os impactos ambientais, de modo a contribuir para a tomada de decisões estratégicas futuras no que diz respeito ao emprego de inovações tecnológicas e desenvolvimento de um produto mais sustentável.
- c) **Público-alvo:** Este estudo tem como público-alvo o mercado consumidor dos produtos Positivo, as partes interessadas do quadro societário e as entidades certificadoras de produtos e normas internacionais (ISO, EPEAT).
- d) **Intenção de publicação e comparação:** O estudo será publicado e terá suas informações utilizadas para configurar um *benchmark* dos produtos da Positivo. Os resultados publicados não devem ser utilizados para comparação com impactos de produtos de mercado, observando as diferenças nas premissas, unidades funcionais e fluxos de referência distintos entre cada estudo.

II. Escopo

Neste item são definidos os itens do escopo previstos na NBR ISO 14040 (2009), considerando o sistema de produto: **Desktop modelo Master C8400 MiniPro**.

a) Função, Unidade Funcional e Fluxo de Referência

A função, unidade funcional e fluxo de referência para o sistema de produto são descritas na Tabela 2. Elas levam em consideração que para realização da função, o produto deve ter o teclado e mouse óptico inseridos no fluxo de referência. Neste estudo analítico, não foi considerado um monitor devido a grande variação de modelos e especificações técnicas (como consumo energético) possíveis.

Tabela 2 - Função, unidade funcional e fluxo de referência

Desktop modelo Master C8400 MiniPro	
FUNÇÃO	Realização de atividades computacionais
UNIDADE FUNCIONAL	1 dispositivo com vida útil de 5 anos (43830 horas)
FLUXO DE REFERÊNCIA	<i>Produto embalado (2326,08g)</i> <i>1 desktop MiniProC8400— 1541,71g (66,28%)</i>

	1 teclado Positivo - 487,36g (20,95%) 1 mouse óptico Positivo - 95,20 g (4,09%) Embalagens - 201,81g (8,68%) Fase de uso: Brasil
--	--

b) Sistema de produto e fronteira

A Figura 1 apresenta o fluxograma do sistema de produto considerado neste estudo de ACV, **dentro de uma abordagem *cradle-to-grave* (berço ao túmulo)**, ou seja, foram considerados os impactos ambientais desde a extração/produção dos insumos utilizados na produção do desktop até as emissões causadas pela disposição final de resíduos.

Os insumos principais vem de diferentes localidades fora do país, incluindo mouse e teclado. A etapa de fabricação do sistema de produto consiste na organização e montagem dos módulos de componentes individuais. A montagem dessa linha de produto ocorre em Ilhéus, Bahia, no Brasil. As placas-mãe são produzidas por um fornecedor, em Manaus, no Amazonas, e transportadas até Ilhéus para montagem.

A fase de uso não considera necessidade de manutenção e *retrofit* do produto dentro da vida útil.

A descrição do objeto de estudo proveio do documento de *Bill of Materials* (BoM) disponibilizado pela Positivo. A Tabela 3 descreve os módulos considerados em cada categoria de componente.

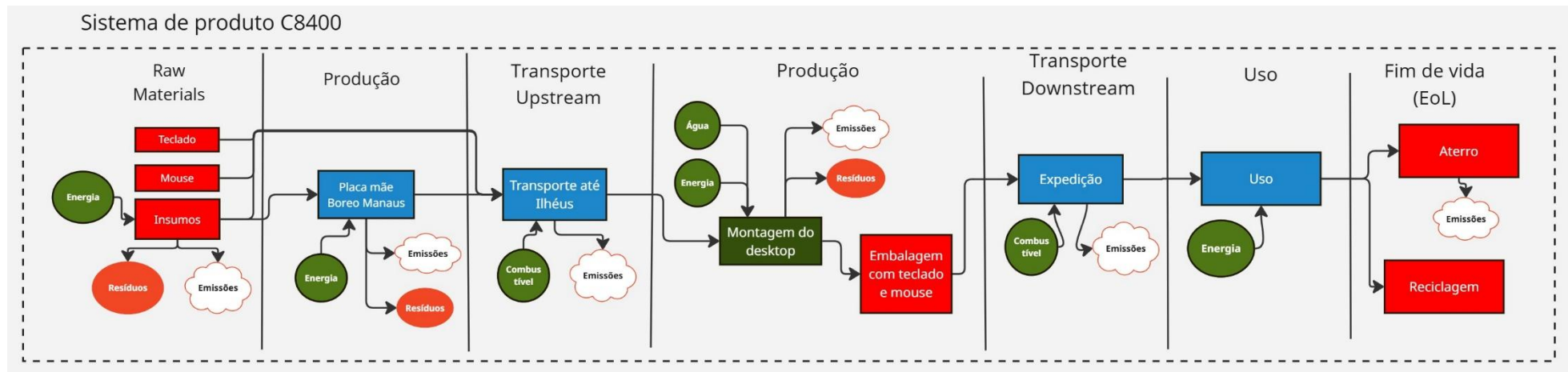
Tabela 3 - Categorias de componentes do produto

Produto	Grupo de componentes definidos no produto
Desktop	Placa mãe, processador, memória RAM, SSD, placa de rede, placa de conectividade, eletroeletrônica, mecânica e embalagem.

c) Procedimentos de alocação

Não foram considerados procedimentos de alocação neste estudo, dado que cada linha de produção é individualizada e o sistema de produto definido gera apenas o produto descrito como desktop Master C8400 MiniPro. Foram consideradas etapas de reciclagem das embalagens, cuja alocação seguiu abordagem cut-off, com alocação das cargas ambientais do processo de reciclagem para o sistema de produto subsequente ao objeto de estudo.

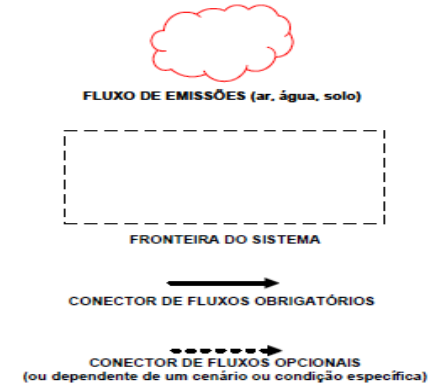
Figura 1 - Fluxograma do sistema de produto



DESCRIÇÃO DAS UNIDADES DE PROCESSOS



DESCRIÇÃO DOS ITENS



d) Métodos e categorias de AICV

A escolha do método de Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida (AICV) considerou critérios técnicos, observando a inclusão das categorias de impactos mais relevantes para o sistema de produto estudado, bem como, o interesse do cliente e do setor de eletroeletrônicos. Essas metodologias serão aplicadas através da ferramenta de software SimaPro v9.4© que fará a compilação dos dados de inventário de ciclo de vida para demonstrar as grandezas de impactos nas categorias relacionadas.

A metodologia ReCiPe 2016 é uma abordagem amplamente utilizada na Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) que converte inventários de emissões e extrações de recursos em impactos ambientais. Ela oferece indicadores em dois níveis: de ponto médio, ou *midpoint em inglês*, como mudança climática, toxicidade humana, ecotoxicidade, uso da terra, entre outros, e de ponto final ou *endpoint*, que agregam os impactos em três categorias de dano: saúde humana, qualidade dos ecossistemas e recursos (HUIJBREGTS, et al, 2017).

Os mecanismos ambientais, bem como os modelos de dano, são fontes de incerteza: os relacionamentos modelados refletem o estado da arte do conhecimento sobre mecanismos ambientais que possuem um certo grau de incompletude e incerteza. Desde a versão 2008, o ReCiPe decidiu agrupar diferentes fontes de incerteza e diferentes escolhas de valor em um número limitado de cenários ou perspectivas, considerando para isso a “Teoria Cultural” de Thompson (1990).

Três perspectivas foram definidas: Individualista (I), Hierarquista (H) e Igualitária (E). Tais perspectivas não têm como intenção representar arquétipos do comportamento humano, mas tão somente agrupar tipos similares de suposições e tomadas de decisão:

- Perspectiva Individualista (I): baseia-se no interesse a curto-prazo, impactos que são indiscutíveis e, otimismo tecnológico quanto à adaptação humana. Seu horizonte temporal é de 20 anos.
- Perspectiva Hierarquista (H): baseia-se nos princípios das políticas mais comuns com relação a prazos e outros problemas. Seu horizonte temporal é de 100 anos.
- Perspectiva Igualitária (E): baseia-se no princípio da prevenção, levando em consideração um horizonte temporal mais longo, tipos de impactos que ainda não estão plenamente estabelecidos, mas, para os quais existe alguma indicação disponível. Seu horizonte temporal é de 1000 anos.

Sendo assim, a versão ReCiPe 2016 midpoint H, foi a versão adotada para este estudo, tendo como foco principal a categoria de impacto Aquecimento Global (*Global Warming*) usando os fatores de caracterização IPCC 2013 GWP 100a.

Como complementação, foram utilizadas as metodologias CED e Usetox 2 para cálculo da demanda cumulativa de energia e do impacto em toxicidade humana e eco toxicidade aquática, respectivamente. A metodologia Cumulative Energy Demand (CED) quantifica o consumo total de energia ao longo do ciclo de vida de um produto, incluindo todas as formas

de energia direta e indireta utilizadas nos processos de extração, produção, uso e descarte. Essa abordagem permite avaliar a dependência de fontes renováveis e não renováveis de energia, sendo amplamente utilizada em estudos de ACV para análise de eficiência energética. A metodologia foi desenvolvida pelo instituto suíço ESU-services e está documentada em Frischknecht et al. (2007).

A metodologia Usetox2 é uma versão atualizada do modelo Usetox, utilizado em Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) para estimar impactos de toxicidade humana e ecotoxicidade aquática. Ela se baseia em modelos multi comportamentais de destino, exposição e efeito de substâncias químicas, considerando emissões para ar, água e solo. Desenvolvido no âmbito da UNEP-SETAC Life Cycle Initiative, o Usetox2 aprimora os fatores de caracterização com base em dados científicos atualizados, maior cobertura de substâncias e melhor consistência matemática, sendo a metodologia de referência internacional para avaliação de toxicidade em ACV (ROSENBAUM, 2008).

Os seguintes critérios foram considerados na AICV:

- I. Nos impactos ambientais mais relevantes para o Brasil, fatores regionalizados foram usados sempre que possível.
 - II. Quando modelos de destino não puderem ser definidos, métodos considerando fatores globais foram utilizados.

A justificativa técnica para esta abordagem baseia-se:

- I. Na natureza global versus regional dos modelos, em decorrência da não existência de métodos brasileiros;
 - II. Na aceitação dos métodos pela comunidade científica.

As categorias de impacto consideradas neste estudo estão listadas na Tabela 4:

Tabela 4 – Categorias de impacto avaliadas

Método	Categoria de impacto	Unidade
ReCiPe 2016 Mid-Point (H)	Mudança do clima (<i>Global Warming Potential</i>) GWP 100 years, IPCC 2013	kg CO ₂ equivalente
	Depleção de Ozônio Estratosférico (<i>Ozone Depleting Substances</i>)	Kg CFC11 equivalente
	Acidificação terrestre (<i>Acidification Potential</i>)	kg SO ₂ equivalente
	Eutrofização de água doce (<i>Eutrophication Potential</i>)	kg P equivalente
	Uso da terra (<i>Land Use</i>)	m ² área de produção equivalente
	Escassez de Recursos Minerais (<i>Metal Depletion</i>)	kg Cu equivalente
	Escassez de Recursos Fósseis (<i>Fossil Depletion</i>)	kg petróleo equivalente
	Consumo de água (<i>Direct and indirect freshwater depletion</i>)	m ³
CED	Demanda Cumulativa de Energia (<i>Cumulative Energy Demand</i>)	MJ
Useto x 2	Toxicidade Humana, câncer e não-câncer (<i>Human toxicity potential</i>)	casos
	Ecotoxicidade – água doce (<i>Freshwater Ecotoxicity</i>)	PAF.m ³ .dia

e) Critérios de corte

Alguns critérios de corte foram assumidos para garantir a representatividade do estudo.

- Componentes com massa medida inferior a 0,05g não foram considerados na análise;
- Não foram consideradas as embalagens que armazenam os componentes para o transporte entre os fornecedores e o local de montagem.
- Para garantir a consistência dos dados adaptados do ensaio, não será estimado uso de monitor no estudo de ACV;
- A fase de uso não considera necessidade de manutenção e *retrofit* do produto dentro da vida útil.

f) Pressupostos e limitações

Os pressupostos e limitações do estudo garantem transparência na fase de interpretação, discussão e comunicação dos resultados. As seguintes suposições e limitações são destacadas, não esgotando a possibilidade de contornos possíveis não evidenciados.

- A infraestrutura do sistema de produto não foi considerada (maquinário e equipamentos de manufatura como parafusadeiras, esteiras mecânicas, etc), evitando que este fator provoque uma distorção nos resultados entre os processos com dados coletados e de bancos de dados;
- A produção de equipamento de capital, instalações e infraestruturas necessárias para a produção estão fora do âmbito desta avaliação;
- Foram utilizados dados adaptados para a etapa de transporte *upstream* e *downstream* do ciclo de produto, considerando transporte aéreo e marítimo internacional e terrestre em território nacional, para cada fase, respectivamente;
- A definição do sistema de produto baseou-se na configuração de produto desse modelo com maior volume de vendas;
- Os produtos desse modelo são montados em Ilhéus, na Bahia;
- Não foram considerados subprodutos gerados durante o processo produtivo, sendo considerado a geração de resíduos total como dado representativo;
- Não foi considerada a reciclagem do produto na etapa de fim de vida;
- O estudo não analisou categorias de impacto de ponto final;
- A massa total do produto foi inferida com base na pesagem das amostras analisadas, onde foi realizada a desmontagem na mínima porção possível sem danificar o produto de maneira irreversível;

- Para qualquer informação ausente no sistema de produto inventariado, foi utilizada prioritariamente a base de dados ecoinvent® v3.10, adaptando-se dados para a matriz energética nacional. Na ausência de dados de algum processo do sistema de produto no ecoinvent®, foram utilizados dados disponíveis publicados na literatura científica ou em outras bases de dados confiáveis.

g) Qualidade dos dados

Primeiramente, foram coletados todos os documentos relacionados a *Bill of Materials* (BoM) que descrevem os componentes envolvidos na montagem do produto. Os registros de consumo de energia, uso de água e geração de resíduos competem ao ano de 2024 e foram avaliados através da análise de dados primários registrada pela empresa.

Quase a totalidade dos dados secundários foram utilizados a partir da base de dados ecoinvent® v3.10, *cut-off*, modificados ou não. Essas modificações, basicamente, se deram na alteração do país e/ou região do *dataset*, de modo a melhor se adequar aos sistemas de produto definidos. Isso significou a observância dos *datasets* existentes no ecoinvent e as substituições deles para aquele geograficamente mais adequado. Apenas o material Poliamida 6.6 (Nylon) com fibra de vidro foi utilizado da *database* "Industry Data 2.0", disponibilizado pela *Plastics Europe*.

Em termos de representatividade, foram priorizados *datasets* que descrevem a geografia onde se dá o processo analisado. Onde não foi encontrado, escolheu-se *dataset* que utiliza a região Resto do Mundo (RoW).

No critério confiabilidade, declara-se que todas as informações foram coletadas através da reprodução de um instrumento de controle gerencial enviado pela equipe Positivo. Os mesmos dados são utilizados pela empresa para seus relatórios de emissões de gases de efeito estufa, verificados por terceira parte nos últimos dois anos. De forma geral, a qualidade dos dados coletados é satisfatória. O memorial de cálculo contendo dados relevantes está anexado a este relatório para maiores detalhes (Anexo 1).

Para garantir a consistência da avaliação, todos os dados primários foram coletados no mesmo nível de detalhamento. A Tabela 5 descreve a origem dos dados das unidades de processos definidas no sistema de produto.

Tabela 5 - Fonte dos dados coletados

MiniPro C8400	Fluxos		Placa-mãe	Desktop	Teclado	Mouse	Embalagem	Montagem	Transporte	Uso	Fim de Vida
	Entradas	Energia	3	3	5	5	5	3	2	1	4,5
		Materiais	3,4,5	3,4,5	5	5	3,4,5	3	3,4		4,5
		Ar	5	5	5	5	5	2,3	5		4,5

	Saídas	Água	5	5	5	5	5	2,5	5		4,5
		Solo	5	5	5	5	5	5	5		4,5
		Produtos	4,5	3,4,5	3,4,5	3,4,5	3,5	3	3		4,5

Legenda: 1 – Medido; 2 – Formulário; 3 – Cálculo teórico; 4 – Literatura; 5 – Ecoinvent;

No quesito de replicabilidade, as informações de inventário de ciclo de vida e premissas compreendidas neste estudo podem ser replicadas para outros produtos Positivo, observadas as quantidades, lista de componentes e sistema de produto analisado.

O estudo deste produto será revisado a cada três anos, conforme o procedimento interno estabelecido para garantir a atualização dos dados e a consistência metodológica do estudo. A cada revisão interna, também será feita uma nova verificação por terceira-parte seguindo o processo descrito abaixo.

h) Tipo de revisão crítica

A revisão deste estudo ocorreu em três etapas:

1. Após a definição do objetivo e do escopo (interno);
2. Após a avaliação do inventário (interno);
3. Relatório final (interno e externo), abrangendo todas as etapas do estudo.

A revisão será conduzida por especialistas, conforme descrito a seguir:

- Revisores internos: Especialistas do FIT Manaus;
- Revisor externo: ACV Brasil;

2. INVENTÁRIO DO CICLO DE VIDA

A confiabilidade dos resultados de um estudo de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) depende diretamente da qualidade do Inventário do Ciclo de Vida (ICV), sendo a representatividade dos dados coletados o principal fator a ser considerado. Esta etapa envolve a identificação e quantificação de todos os fluxos de entrada e saída — como materiais, energia, emissões e resíduos — ao longo das diferentes fases do ciclo de vida do produto analisado.

Neste capítulo, são apresentadas as estratégias adotadas para a coleta de dados, as hipóteses e premissas consideradas, bem como o tratamento dos dados de produção. Também são detalhadas as modelagens específicas para as fases de uso, transporte e fim de vida, de forma a garantir transparência e rastreabilidade dos dados utilizados. A abordagem visa assegurar coerência metodológica e permitir a reprodutibilidade dos resultados.

I. Coleta de dados

De acordo com o fluxograma apresentado no capítulo 1.II.b, foram coletados dados primários apenas do processo produtivo do produto acabado, considerado como *gate-to-gate*. Informações referentes ao gasto energético, uso de água, geração de resíduos, emissões e subprodutos foram fornecidas pela equipe de pontos focais da Positivo Tecnologia numa tabela de controle anual, encontrada no Anexo I - Memorial de cálculo.

Os dados de massa dos módulos e componentes individuais foram coletados com base na desmontagem de amostras de produtos fornecidos pela Positivo e pesagem utilizando balança de precisão de 0,01g.

A composição dos componentes eletroeletrônicos foi rigorosamente estimada a partir de desenhos industriais fornecidos pelos fabricantes, além de testes de conformidade com a diretiva RoHS, que assegura a exclusão de substâncias perigosas em produtos eletrônicos. Adicionalmente, foram empregadas ferramentas de inteligência artificial para aprimorar a precisão das análises e previsões sobre os materiais utilizados. Foram considerados processos de transformação de *raw materials* em componentes finais através de agrupamento das massas da seguinte forma: injeção para componentes plásticos e usinagem em alumínio, cobre e aço inoxidável para componentes metálicos.

Os inventários de massa podem ser visualizados na Tabela 6:

Tabela 6 - Inventário mássico do Master C8400 MiniPro

MiniPro C8400			
PRODUÇÃO	Desktop MiniProC8400 (g)	1541,71	66,28%
	Teclado Positivo (g)	487,38	20,95%
	Mouse óptico Positivo (g)	95,21	4,09%

	Embalagens (g)	201,83	8,68%
	TOTAL (g)	2.326,13	100,00%
USO	Energia (kWh/ano)	60,14 kWh	20,00%
	TOTAL 5 ANOS (kWh)	300,70 kWh	100,00%

Dado que diversos componentes listados são compostos por mais de um material representativo, estabeleceu-se uma base de 6 materiais para tentar representar o componente de forma significativa. Essa metodologia garante um embasamento sólido e confiável, refletindo as melhores práticas da indústria e assegurando a qualidade e a segurança dos componentes em questão.

A partir dos dados recebidos e considerando que as linhas de montagem são individualizadas e não geram mais do que um produto por processo, foi possível aplicar o procedimento de cálculo descrito no item 2.III para encontrar a parcela de recursos dedicada à produção de uma unidade de produto analisado.

II. Hipóteses e premissas

1. Para a placa-mãe, adaptou-se o *dataset* “*Printed wiring board, mounted mainboard*” buscando adequá-lo à realidade e grid energético de um processo de montagem realizado no Brasil;
2. Para o adaptador AC que compõe o PSU foi utilizado o *dataset* “*Power adapter, for laptop {GLO}| production | Cut-off, U*”;
3. Para o teclado, utilizou-se o *dataset* “*Keyboard {GLO}| production | Cut-off, U*”;
4. Para o mouse, utilizou-se o *dataset* “*Pointing device, optical mouse, with cable {GLO}| production | Cut-off, U*”;
5. Para a modelagem dos componentes do *desktop*, adotou-se uma abordagem simplificada com base em inspeção direta, conhecimento técnico e literatura especializada sobre equipamentos eletroeletrônicos;
6. Cada componente foi representado por até seis materiais, priorizando aqueles com maior massa ou relevância ambiental, conforme práticas compatíveis com diretrizes da ISO 14044. Estes materiais foram listados com base nos materiais disponíveis nas livrarias doecoinvent, incluindo *datasets* de componentes inteiros como “*Integrated circuit, logic type {GLO}| production | Cut-off, U*”;
7. A distribuição percentual dos materiais foi expressa em valores inteiros ou com decimais de 0,5%, a fim de manter clareza e padronização nos dados;
8. Quando materiais secundários, como adesivos ou revestimentos, foram desconsiderados, sua massa foi redistribuída proporcionalmente entre os demais, com base na fração relativa de cada material;
9. Não foi considerada a manutenção ou substituição de peças no produto;

10. Devido à falta de informações relacionadas ao processo de reciclagem de produtos, foi avaliado apenas a hipótese de descarte em aterro sanitário, utilizando um *dataset* global para representação do processo.

III. Processamento dos dados de produção

O produto é fabricado no polo de Ilhéus, Bahia, onde outros produtos também são fabricados em linhas diferentes. Devido à falta de dados segmentados de fluxos produtivos relacionados as utilidades da planta produtiva para o produto estudado, fez-se necessário o cálculo de uma proporção de rateio para adaptar os dados recebidos para o estudo, de forma representativa.

A partir das métricas totais de produção da fábrica, como: gasto energético (eletricidade e combustível), gasto de água, assim como geração de resíduos, efluentes e emissões atmosféricas, foi criada uma proporção de rateio baseada no número de unidades produzidas, como demonstrado nas Tabelas 7 e 8:

Tabela 7 - Unidades produzidas do desktop MiniPro na planta de Ilhéus-BA em 2024.

Produção o MiniPro	JA N	FE V	MA R	AB R	MA I	JU N	JU L	AG O	SET	OU T	NO V	DEZ	ACUMULAD O
	0	200	845	117 0	50	0	570	1500	188 0	248 0	2896	206 3	13.654

Tabela 8 - Produção total de produtos na planta de Ilhéus-BA em 2024.

Produção total Ilhéus	Desktops/Minis	Notebooks	All in one	Urnas	Smartphones	Acumulado
	105.495	1.256	13.493	42.078	479.845	642.167

Considerando-se apenas ambas as informações, pode-se inferir uma proporção de:

$$\frac{13.654}{642.167} = 0,0212$$

Traduzindo a informação:

A partir do número total de unidades produzidas, pode-se inferir que 2,12% dos gastos de produção se atribuem ao modelo MiniPro C8400.

Entretanto, percebe-se que os diferentes produtos fabricados têm gastos energéticos diferentes, devido ao variado nível de complexidade e formatação de produtos eletroeletrônicos. Portanto, decidiu-se que uma etapa adicional de cálculo é necessária para tornar os dados de produção mais acurados.

Assumindo que os processos produtivos são similares, ou seja, se tratam de processos de manufatura de montagem com linhas preestabelecidas, pode-se assumir uma uniformidade de equipamentos utilizados e, portanto, de insumos e corpo técnico atrelado. A partir dessa

consideração, buscou-se inferir o tempo médio de produção de cada tipo de produto e cada categoria geral apresentada na Tabela 9, junto dos cálculos sugeridos.

Tabela 9 - Tempo de produção e porcentagem de tempo despendido em cada categoria de produto.

	Produto	Tempo de produção (min)	Tempo total em produção	Média categoria (min)	Tempo total em produção (min)	%
DESK	MiniPro	33,87	462.461	41,80	4409515	18,31%
	SFSH02 - Collins	44,7				
	SFIW02 - Coralina	44,7				
	S501	44,7				
	CE685	44,7				
	EN042	38,12				
ALL IN ONE	ADPT2	39,96		38,04	513274	2,13%
	W2150	36,67				
	A215	37,49				
SMARTPHONE	SMART 8	30,54		33,74	16188051	67,23%
	HOT 40i	30,98				
	NOTE 40i	36,09				
	RANGER 2	39,41				
	HOT 50i	31,66				
NOTEBOOKS	VAIO N16EPA	35,57		38,95	48915	0,20%
	DN50 E (PRODESP)	42,32				
URNA	URNA	69,38		69,38	2919372	12,12%
				Total	24079126	100%

A partir desses dados e cálculos, duas metodologias podem ser aplicadas para definir um rateio para o produto. A primeira delas considera a razão entre o tempo total em produção do MiniPro e o tempo total de produção da fábrica, chegando a uma razão de 1,92%.

A segunda metodologia, que será adotada neste estudo, observa que apesar de que o modelo em estudo (MiniPro) tenha um tempo de produção significativamente menor que os outros de sua categoria, a média aritmética da categoria foi o dado relevante para estimar um tempo de produção total da fábrica (24.079.126 minutos), portanto, deve-se utilizar a razão entre o número de MiniPros produzidos e o total de desktops/minis produzidos na categoria e multiplicar essa razão pelo resultado de porcentagem da categoria desktops/minis como demonstrado abaixo:

$$\frac{13654}{105495} = 12,94\% * 18,31\% = 2,37\%$$

Finalmente, chega-se à conclusão de que 2,37% dos dados de produção se referem a produção do modelo C8400 MiniPro. Esse valor de rateio foi aplicado aos dados de produção que contém os fluxos de entrada e saída das utilidades produção da Positivo no polo de Ilhéus, Bahia.

IV. Fase de uso

Para esse estudo, o consumo de energia do Positivo Master C8400 MiniPro foi extraído com base no relatório de ensaio de eficiência energética realizado para o produto em 2024, de acordo com a portaria INMETRO / MDIC nº 304 (2023). No ensaio foram considerados três configurações: desligado, adormecido e inativo.

De acordo com a Tabela 10, extraída do ensaio, é possível inferir o valor de gasto energético medido de 60,14 kWh/ano. No ensaio não foi considerado o gasto energético de um monitor, normalmente atrelado ao uso de um *desktop*. Para garantir a consistência dos dados adaptados do ensaio, não será estimado uso de monitor no estudo de ACV.

Tabela 10 - Resultado de ensaio de eficiência energética

Tabela 2 – Critérios de Eficiência Energética e Gestão de Energia			
Temperatura ambiente (°C):		Umidade relativa do ar (%):	
Potências medias		Fatores de ponderação obtidos	
Pd	0,55 W	Td	0,55
Pa	0,90 W	Ta	0,05
Pi	12,30 W	Ti	0,40
ETEC	60,14 kWh		
Observações:			

Na tabela, os valores de Pd, Pa e Pi se referem ao consumo medido em cada estado de uso e os valores de Td, Ta e Ti são fatores de ponderação definidos na portaria INMETRO / MDIC nº 304 (2023).

A fase de uso considerou um tempo de vida útil de 5 anos, portanto, 43830 horas no total. Portanto, para este estudo de ACV, será considerado o valor total de 60,14 kWh x 5 anos, representando um valor total de 300,70 kWh gastos no tempo de vida útil do equipamento. O *dataset* selecionado do ecoinvent para representar o consumo energético foi “Electricity, low voltage {BR}| market group for electricity, low voltage | Cut-off, U”, considerando um mix de regiões brasileiras nas quais o produto poderia ser utilizado.

V. Fases de transporte

As fases de transporte, tanto upstream quanto downstream, são comumente associadas a emissões significativas, o que destaca a importância de se investigar detalhadamente seus impactos no ciclo de vida do produto. Neste estudo, foram adaptados dados declarados no Inventário de Gases de Efeito Estufa (GEE) produzido pela Positivo para o ano de 2024.

Neste Inventário, constam informações segmentadas por modais (aéreo, hidroviário e rodoviário) de trecho, distância e *peso da carga*. Estes dados foram adaptados de forma a serem representados dentro de um dos *datasets* disponíveis no ecoinvent, na unidade tkm (tonelada por quilometro), de acordo com as Tabelas 11 e 12.

Tabela 11 - Dados adaptados de transporte upstream e downstream

	Terrestre			Marítimo			Aéreo		
	Distância (km)	Carga (t)	t.km	Distância (km)	Carga (t)	t.km	Distância (km)	Carga (t)	t.km
<u>Transporte Upstream</u>									
Total	688591	683	961536	1969698	554	9428957	5678025	130	2065470
2,37%	16320	16	22788	46682	13	223466	134569	3	48952
unidade	1,195	0,001	1,669	3,419	0,001	16,366	9,856	0,0002	3,585
<u>Transporte Downstream</u>									
Total	19086693	3688	2391212	0	0	0	3607678	187	270865
2,37%	452355	87	56672	0	0	0	85502	4	6420
unidade	33,130	0,006	4,151	0	0	0	6,262	0,000	0,470

Tabela 12 - Datasets utilizados em cada modal de transporte

Modal	Dataset	Valor (tkm)
Terrestre	Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO5 {BR} transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO5 Cut-off, U	5,820
Marítimo	Transport, freight, sea, container ship {GLO} transport, freight, sea, container ship Cut-off, U	16,366
Aéreo	Transport, freight, aircraft, long haul {GLO} transport, freight, aircraft, dedicated freight, long haul Cut-off, U	4,055

VI. Fase de fim de vida (End-of-life EoL)

A etapa de fim de vida foi modelada considerando a destinação final dos resíduos sólidos urbanos no Brasil, com base nos dados mais recentes disponibilizados pelo IBGE (2023), que apontam a seguinte distribuição entre os municípios brasileiros: 28,6% utilizam aterros sanitários, 18,7% recorrem a aterros controlados e 31,9% ainda empregam lixões como forma de disposição final. Os demais municípios não informaram ou adotam outras formas de descarte, sem representação clara nos bancos de dados.

Para representar essa realidade no modelo de Avaliação de Ciclo de Vida (ACV), adotou-se uma abordagem proporcional, utilizando os processos disponíveis no banco ecoinvent® v3.10 que melhor se aproximam de cada tipo de destinação. Com o objetivo de adotar uma postura conservadora, os 20,8% de municípios não classificados foram integralmente alocados à categoria de lixões (open dump), por serem potencialmente os mais impactantes do ponto de vista ambiental.

As embalagens, por sua vez, compõem cerca de 8,6% do peso total do sistema avaliado e foram retiradas do peso destinado ao aterro, considerando a reciclagem parcial da massa de 201,83 g composta por 139,09 g de papelão/papel pardo e 62,74 g de plásticos diversos.

As taxas de reciclagem consideradas foram de 85% para papel/papelão, conforme dados do CEMPRE (2022), e de 24,3% para plásticos, conforme estudo da ABIPLAST (2023). Com base nessas taxas, foram reciclados 118,23 g de papel/papelão e 15,25 g de plásticos, totalizando 133,48 g de materiais reciclados. A massa restante das embalagens, 68,35 g, foi reintegrada à massa total de resíduos destinada à disposição final, resultando em um total de 2.192,6 g. As etapas de reciclagem seguiram abordagem de alocação por corte (cut-off) adotada neste estudo, segundo a qual materiais enviados para reciclagem são excluídos do sistema avaliado, com seus impactos e benefícios alocados a ciclos de vida futuros.

A distribuição final das massas e os *datasets* utilizados para modelar o fim de vida no ecoinvent v3.10 são apresentados na Tabela 13 a seguir:

Tabela 13 - Dados utilizados para fase de fim de vida

Destinação	%	Massa (g)	Dataset ecoinvent
Reciclagem papel/papelão –		118,23	Core board (waste treatment) {GLO} recycling of core board Cut-off, U
Reciclagem plástico -		15,25	Mixed plastics (waste treatment) {GLO} recycling of mixed plastics Cut-off, U
Lixão (open dump)	52,7%	1184,57	Municipal solid waste {GLO} treatment of municipal solid waste, open dump, very wet infiltration class (1000mm) Cut-off, U
Aterro controlado	18,7%	419,81	Municipal solid waste {GLO} treatment of municipal solid waste, unsanitary landfill, very wet infiltration class (1000mm) Cut-off, U
Aterro sanitário	28,6%	588,22	Municipal solid waste {RoW} treatment of, sanitary landfill Cut-off, U

Essa abordagem permite representar com maior realismo a heterogeneidade da infraestrutura de destinação de resíduos sólidos no Brasil, além de incorporar os diferentes perfis de emissão e impacto ambiental de cada rota de descarte. A adoção de processos com *very wet infiltration* (1000 mm/ano) foi feita com base no clima predominante em grande parte do território nacional, caracterizado por altos índices pluviométricos, o que potencializa a formação de lixiviados e a mobilização de poluentes em aterros.

Reconhece-se que a ausência de modelagem específica para processos de reciclagem de eletroeletrônicos e embalagens constitui uma limitação do estudo, mas condiz com a realidade de descarte observada no contexto brasileiro atual e contribui para uma avaliação conservadora dos impactos ambientais.

3. AVALIAÇÃO DE IMPACTO DO CICLO DE VIDA

A Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida (AICV) é a terceira etapa de uma ACV (Avaliação do Ciclo de Vida). Ela tem como objetivo transformar os dados do inventário do ciclo de vida (ICV) em informações claras sobre os impactos ambientais que o produto ou serviço gera. Essa etapa classifica as entradas e saídas do ICV combinando e calculando com base em fatores de caracterização, os valores de cada categoria de impacto para as diferentes unidades de processo do ciclo de vida do produto ou serviço.

O método utilizado para quantificar o impacto das emissões de gases de efeito estufa (pegada de carbono) do sistema de produto estabelecido para este estudo foi o ReCiPe 2016. O método adota fatores de caracterização globais, baseados em médias mundiais, e não valores regionalizados específicos, dado que a maioria dos *datasets* não considera os continentes americanos, estando inclusos na categoria *Rest of the World (RoW)*. A mesma lógica se aplicou aos métodos CED e Usetox 2.

Os cálculos de impacto foram realizados com o *software* SimaPro® v9.4. Em conformidade com os objetivos deste estudo e a ISO 14044, não houve normalização e ponderação dos resultados da AICV.

I. Resultados

Os resultados apresentados nesta seção devem ser utilizados dentro dos limites de escopo e hipóteses deste estudo, considerando suas limitações. Os impactos potenciais calculados pela ACV são estimativas e fundamentadas nos fatores de impacto dos métodos de caracterização, não devendo ser interpretados como impactos reais dos produtos.

Os resultados deste estudo são apresentados de forma a esclarecer a magnitude do impacto ambiental calculado nas 12 categorias de impacto definidas no escopo. Um total de 40 materiais e processos primários (ou seja, diretamente relacionados ao produto) compuseram a avaliação de impacto final. Neste capítulo, serão apresentados gráficos de barras com a análise de contribuição dos 10 materiais ou processos mais representativos da etapa de produção de matérias-primas por categoria de impacto, com o objetivo de proporcionar uma visualização mais clara e informativa dos resultados.

De forma geral, os resultados finais podem ser observados na Tabela 14.

Tabela 14 - Resultados nas 12 categorias de impacto

Categoria de Impacto	Unidade	Total
Aquecimento global (<i>Global warming</i>)	kg CO ₂ eq	228,897
Depleção de ozônio estratosférico (<i>Stratospheric ozone depletion</i>)	kg CFC11 eq	2,71E-04
Acidificação terrestre (<i>Terrestrial acidification</i>)	kg SO ₂ eq	1,030
Eutrofização aquática (<i>Freshwater eutrophication</i>)	kg P eq	0,033
Uso de terra (<i>Land use</i>)	m ² área de produção eq	9,601

Escassez de recursos minerais (<i>Mineral resource scarcity</i>)	kg Cu eq	4,974
Escassez de recursos fósseis (<i>Fossil resource scarcity</i>)	kg petróleo bruto eq	57,076
Consumo de água (<i>Water consumption</i>)	m ³	7,810
Demanda cumulativa de energia (<i>Cumulative Energy Demand (CED)</i>)	MJ	4291,648
Toxicidade Humana (<i>Human toxicity, câncer</i>)	casos	1,71E-08
Toxicidade Humana (<i>Human toxicity, non-câncer</i>)	casos	3,39E-09
Ecotoxicidade aquática (<i>Freshwater ecotoxicity</i>)	PAF.m3.dia	4,118

De acordo com os dados analisados, pode-se representar graficamente na Figura 2 a contribuição de cada fase do ciclo de vida para cada categoria de impacto. Conclui-se que as fases que mais contribuem em todas as categorias são a dos ciclos de produção de matérias-primas e da fase de uso do produto, representando mais de 85% do impacto em todas as categorias.

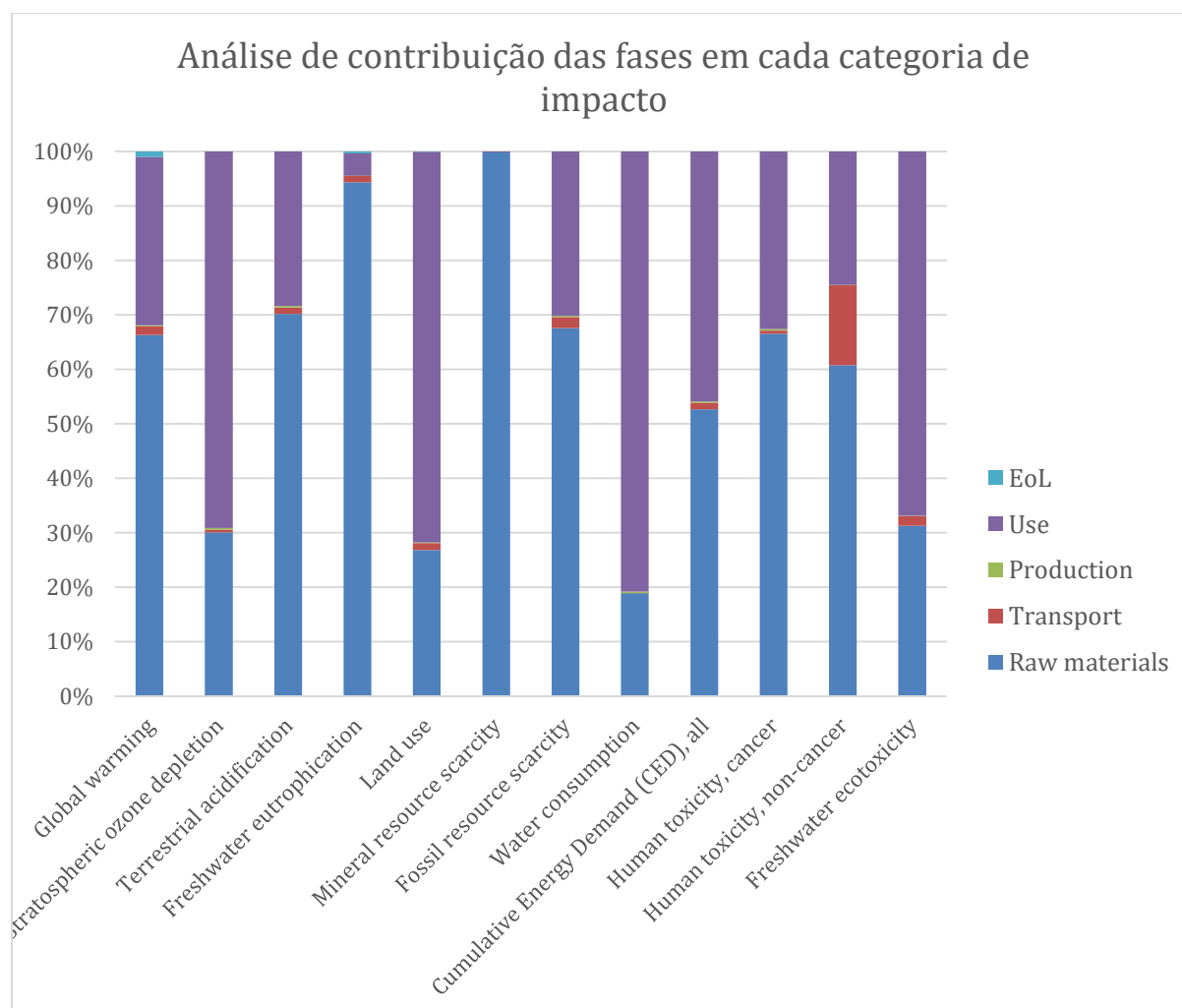


Figura 2 - Contribuição das fases do ciclo de vida em cada categoria de impacto.

a) Aquecimento Global (Global warming)

O impacto avaliado nesta categoria é da ordem de 228,897 kgCO₂eq. Nesta categoria, os resultados se mostraram mais expressivos nas fases de matéria-prima (66,34%) e uso (30,91%). Dentro da fase de matéria-prima, a placa-mãe (*Printed wiring board, mounted mainboard, laptop computer, Pb free {GLO}| production in Brazil | Cut-off, U*) compõe cerca de 70% das emissões.

Outros componentes como mouse, teclado e adaptador AC, adquiridos através de fornecedores do tipo *Original Equipment Manufacturers* (OEMs), companhias que produzem partes ou produtos completos para que outras empresas utilizem em seus produtos, contribuíram significativamente nessa categoria devido a presença de circuitos integrados em sua composição como teclado e mouse óptico. Quando comparado a resultados da literatura, corrobora-se a relação entre massa do dispositivo e emissões incorporadas, com resultados semelhantes de emissões de CO₂eq para produtos da mesma categoria (TEEHAN, P., & KANDLIKAR, M, 2013).

Apesar da utilização de dados primários e de *datasets* adaptados para o consumo energético na fabricação da placa-mãe em território brasileiro, esse componente ainda se destaca como o principal responsável pelos impactos ambientais do produto nesta categoria. A principal contribuição ocorre na fase de obtenção das matérias-primas, especialmente dos metais que a compõem. É nessa etapa que ocorre a maior emissão de gases de efeito estufa associados ao ciclo de vida da placa-mãe. Além disso, essa fase é responsável por volumes significativos de poluição atmosférica, geração de águas residuais e resíduos sólidos (CHOI et al., 2006).

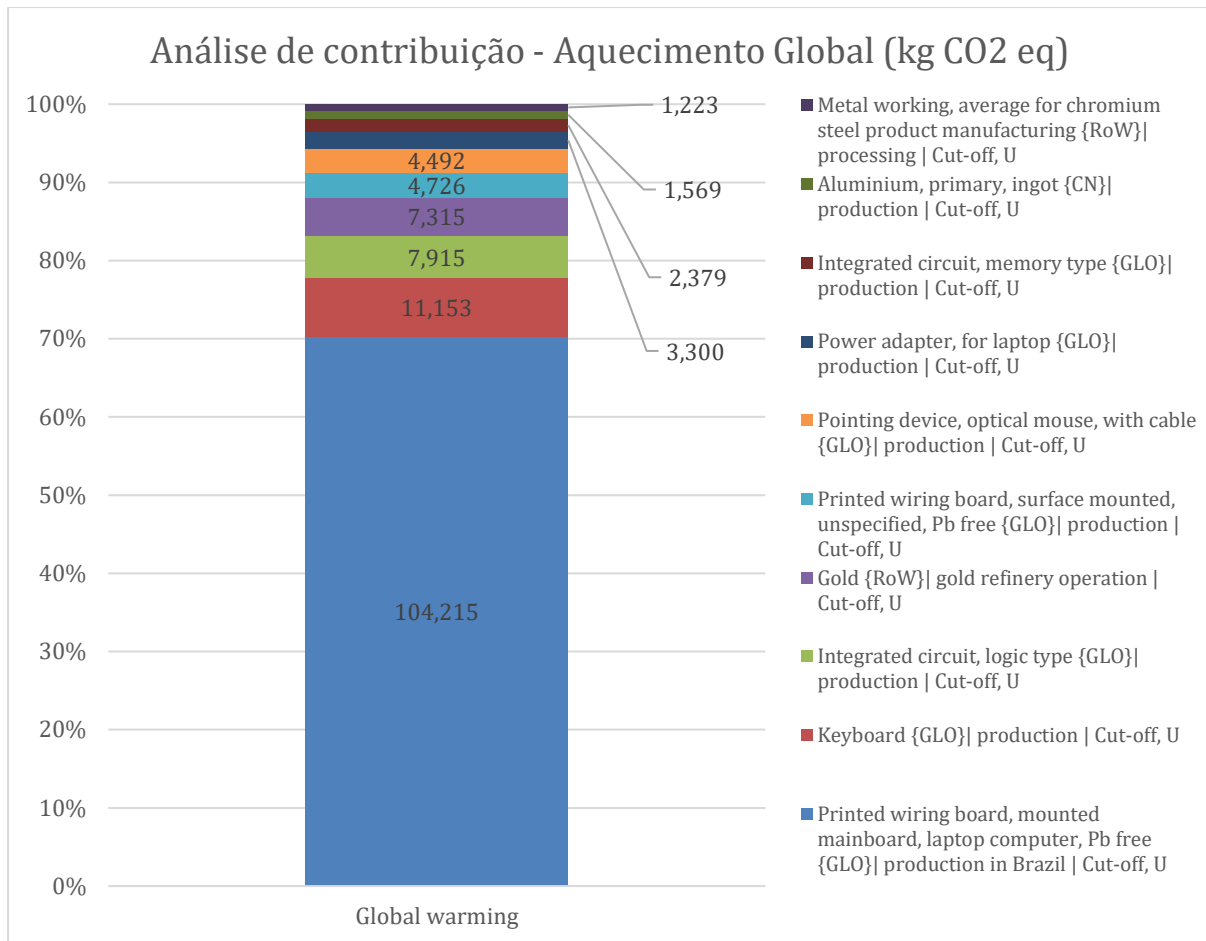


Figura 3 - Análise de contribuição da produção das matérias-primas - Aquecimento Global

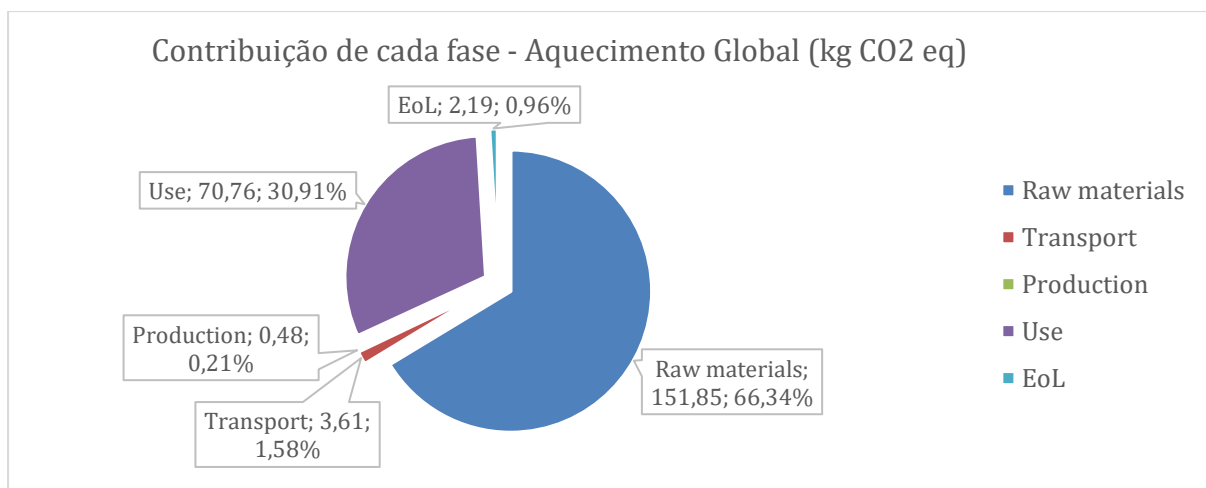


Figura 4 - Análise de contribuição por fases do ciclo de vida - Aquecimento Global

b) Depleção de Ozônio Estratosférico (*Stratospheric ozone depletion*)

O impacto mensurado na categoria foi de $2,71 \times 10^{-4}$ kg CFC-11 eq. Dentre as matérias-primas do produto, os maiores contribuintes para a categoria permaneceram na placa-mãe e periféricos com placas de circuito impresso embutidas, contabilizando cerca de 85% do impacto em matéria-prima na categoria.

Além de componentes menores e periféricos como teclado, adaptador AC e mouse óptico (13%), observou-se uma contribuição significativa (~10%) de matérias-primas como ouro e tetrafluoretileno para o impacto nessa categoria.

Entre as fases do ciclo de vida, a fase de uso foi a mais impactante, respondendo por 69,09% do total de emissões. Esse resultado pode estar associado à geração de eletricidade utilizada durante a operação do desktop, que mesmo em uma matriz energética predominantemente renovável, ainda envolve emissões indiretas de substâncias precursoras de degradação do ozônio, como CFCs e HCFCs, presentes em processos industriais. A fase de produção de matérias-primas também apresentou contribuição relevante (30,06%), reflexo de etapas industriais que empregam substâncias com potencial de destruição do ozônio em processos como a fabricação de semicondutores e placas eletrônicas, os quais frequentemente envolvem gases halogenados em etapas de limpeza ou controle térmico.

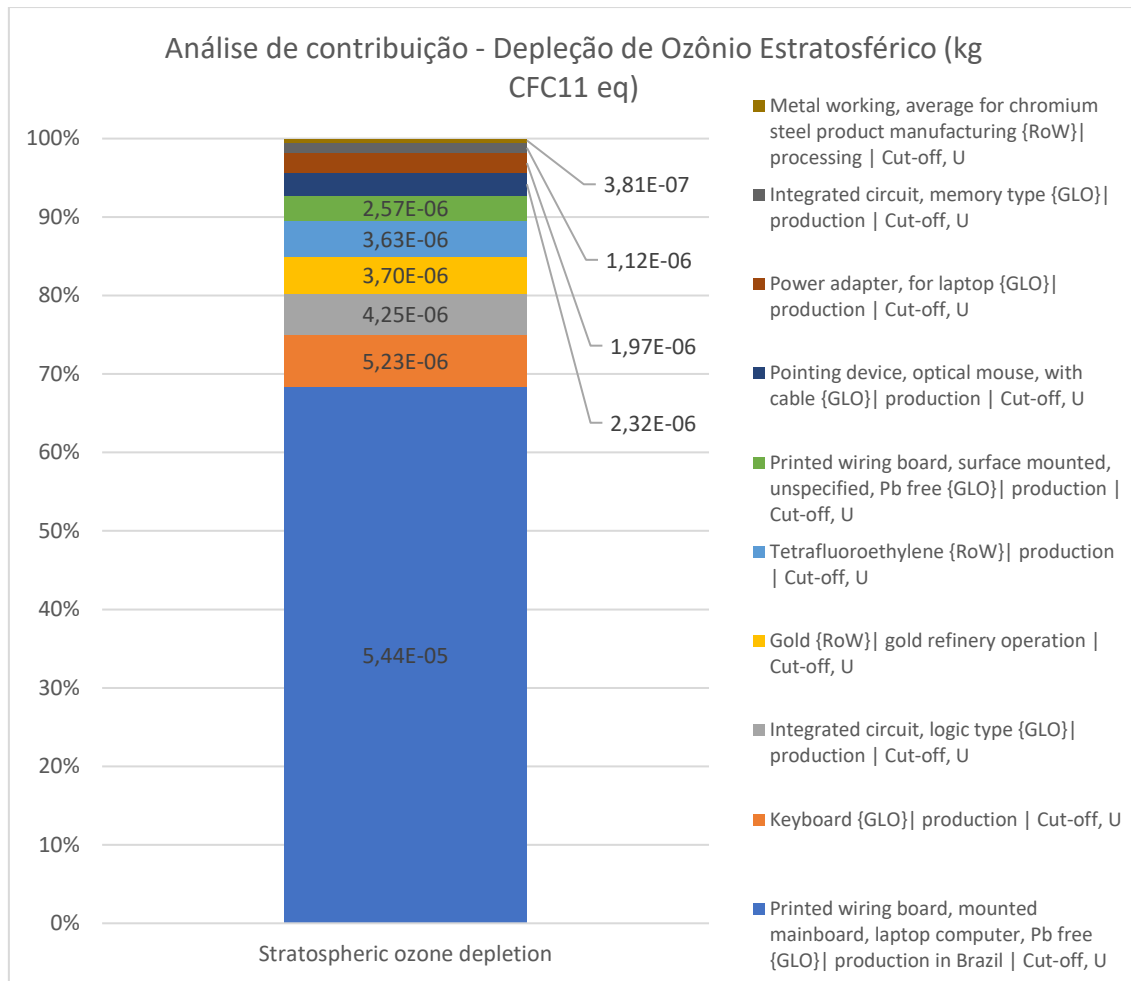


Figura 5 - Análise de contribuição da produção das matérias-primas - Depleção de ozônio estratosférico

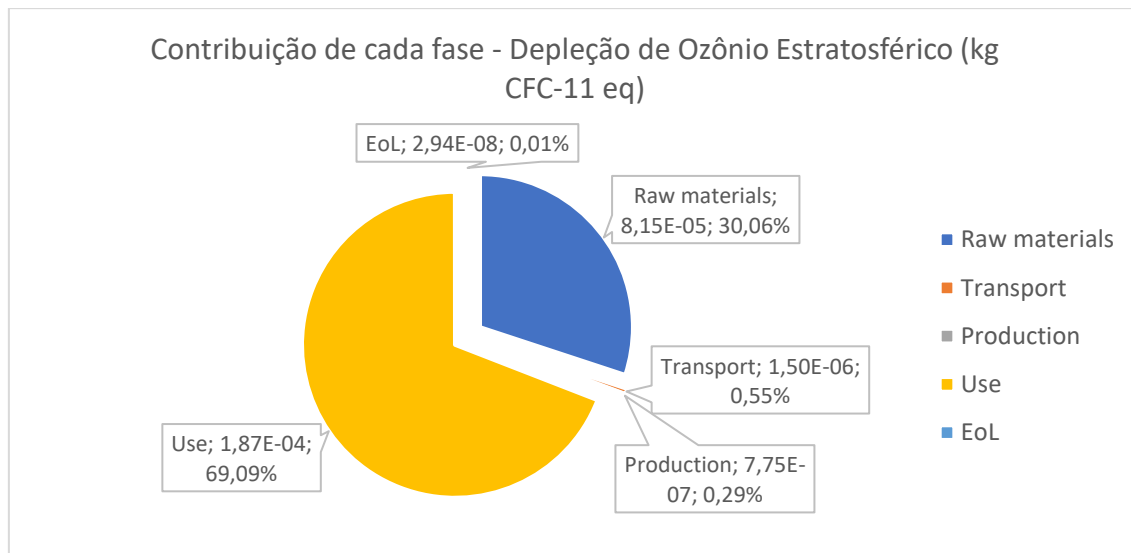


Figura 6 - Análise de contribuição por fases do ciclo de vida - Depleção de ozônio estratosférico

c) Acidificação Terrestre (*Terrestrial acidification*)

O resultado de 1,030 kg SO₂ eq em acidificação terrestre indica a quantidade de emissões com potencial acidificante equivalente à liberação de 1,030 kg de dióxido de enxofre (SO₂) ao ambiente durante o ciclo de vida do produto. A acidificação terrestre está associada à liberação de compostos ácidos na atmosfera, como SO₂, NO_x e NH₃, que se depositam no solo e na vegetação, prejudicando a biodiversidade, o pH do solo e sistemas hídricos (EEA, 2014).

Na categoria de acidificação terrestre, a produção de componentes eletroeletrônicos foi novamente a principal responsável pelos impactos observados (70,16%). Somando-se os impactos das placas de circuito impresso e de itens periféricos, obtém-se cerca de 90% do total gerado na fase de matérias-primas, evidenciando a elevada pegada ambiental associada à fabricação desses componentes. Tal resultado está relacionado à alta demanda energética dos processos produtivos e à intensa utilização de metais, cujas etapas de extração e beneficiamento liberam emissões atmosféricas relevantes, como dióxidos de enxofre (SO₂) e óxidos de nitrogênio (NO_x), principais precursores da acidificação.

A fase de uso, por sua vez, representou 28,36% do impacto total na categoria, valor influenciado pelas emissões indiretas associadas à geração de eletricidade consumida durante a operação do desktop, mesmo que a matriz elétrica brasileira seja majoritariamente renovável.

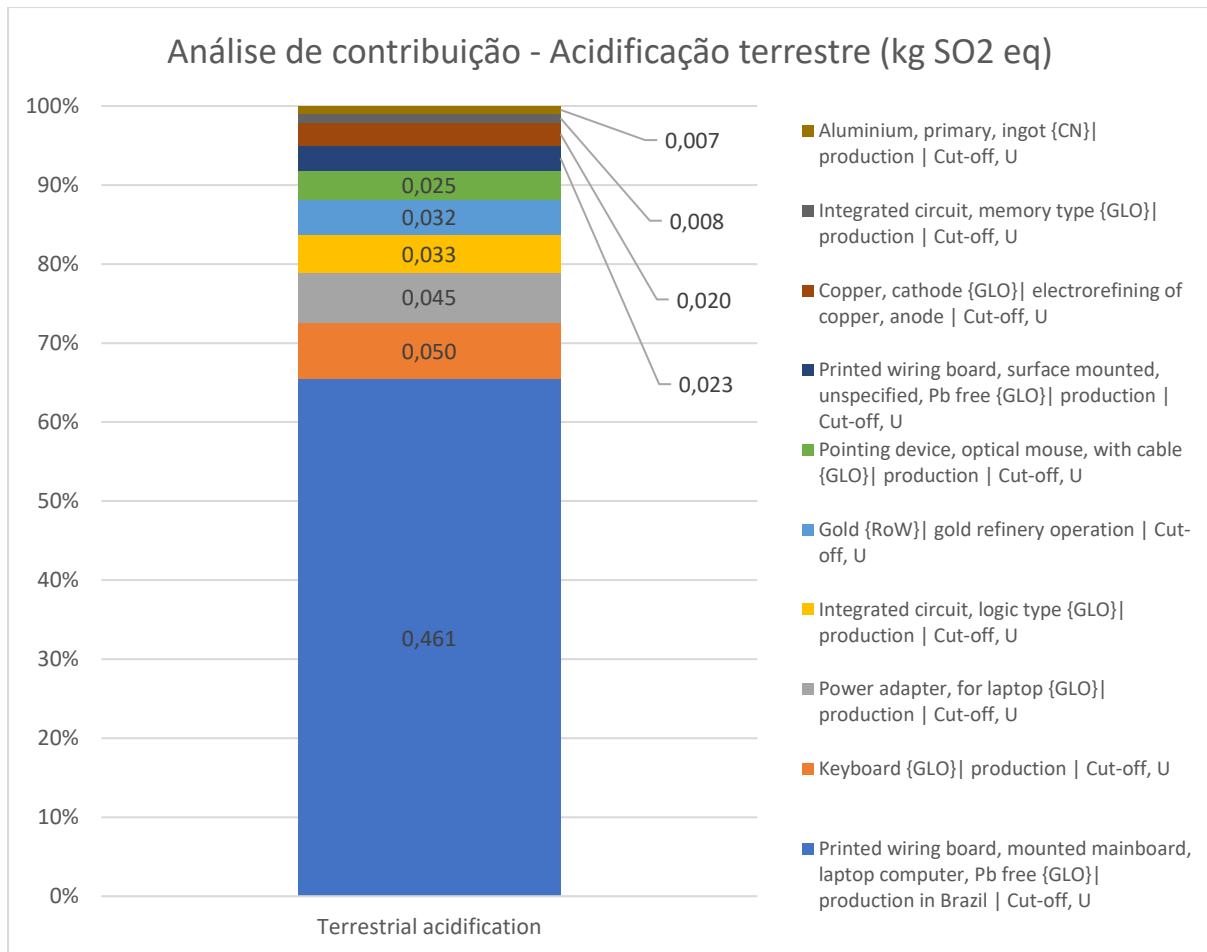


Figura 7 - Análise de contribuição da produção das matérias-primas - Acidificação terrestre

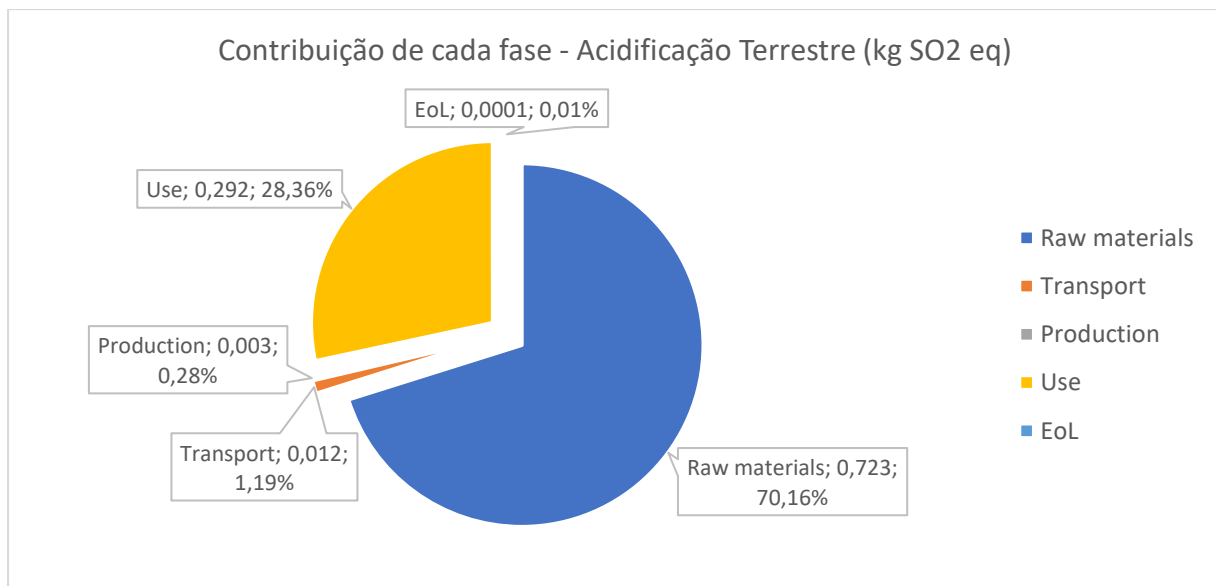


Figura 8 - Análise de contribuição por fases do ciclo de vida - Acidificação Terrestre

d) Eutrofização aquática (Freshwater eutrophication)

Na categoria de eutrofização aquática, o impacto total estimado foi de 0,033 kg P eq, representando o potencial de contribuição do sistema avaliado para o enriquecimento de corpos d'água com nutrientes, especialmente fósforo. Esse fenômeno pode desencadear a proliferação excessiva de algas, redução de oxigênio dissolvido e consequente desequilíbrio ecológico nos ecossistemas aquáticos.

A fase de produção de matérias-primas foi responsável por 94,33% do impacto nesta categoria, com destaque para os circuitos impressos da placa-mãe e dos periféricos, cujos processos de extração e beneficiamento de metais envolvem o uso intensivo de reagentes químicos e o risco de emissões indiretas de compostos nitrogenados e fosforados nos efluentes industriais.

A fase de uso contribuiu com apenas 4,06%, valor associado principalmente às emissões indiretas da geração de eletricidade, ainda que essas sejam consideravelmente menores devido ao perfil renovável da matriz energética brasileira.

A fase de fim de vida, por sua vez, respondeu por 0,37% do impacto total. Esse valor está relacionado à destinação final dos resíduos em sistemas de disposição com baixa ou nenhuma infraestrutura de controle ambiental, conforme modelado com base na realidade brasileira. A presença de materiais eletroeletrônicos contendo aditivos químicos, metais e polímeros, quando descartados em lixões ou aterros controlados, pode favorecer a lixiviação de nutrientes e compostos solúveis em ambientes com alta infiltração hídrica, contribuindo para a carga de fósforo em corpos d'água próximos.

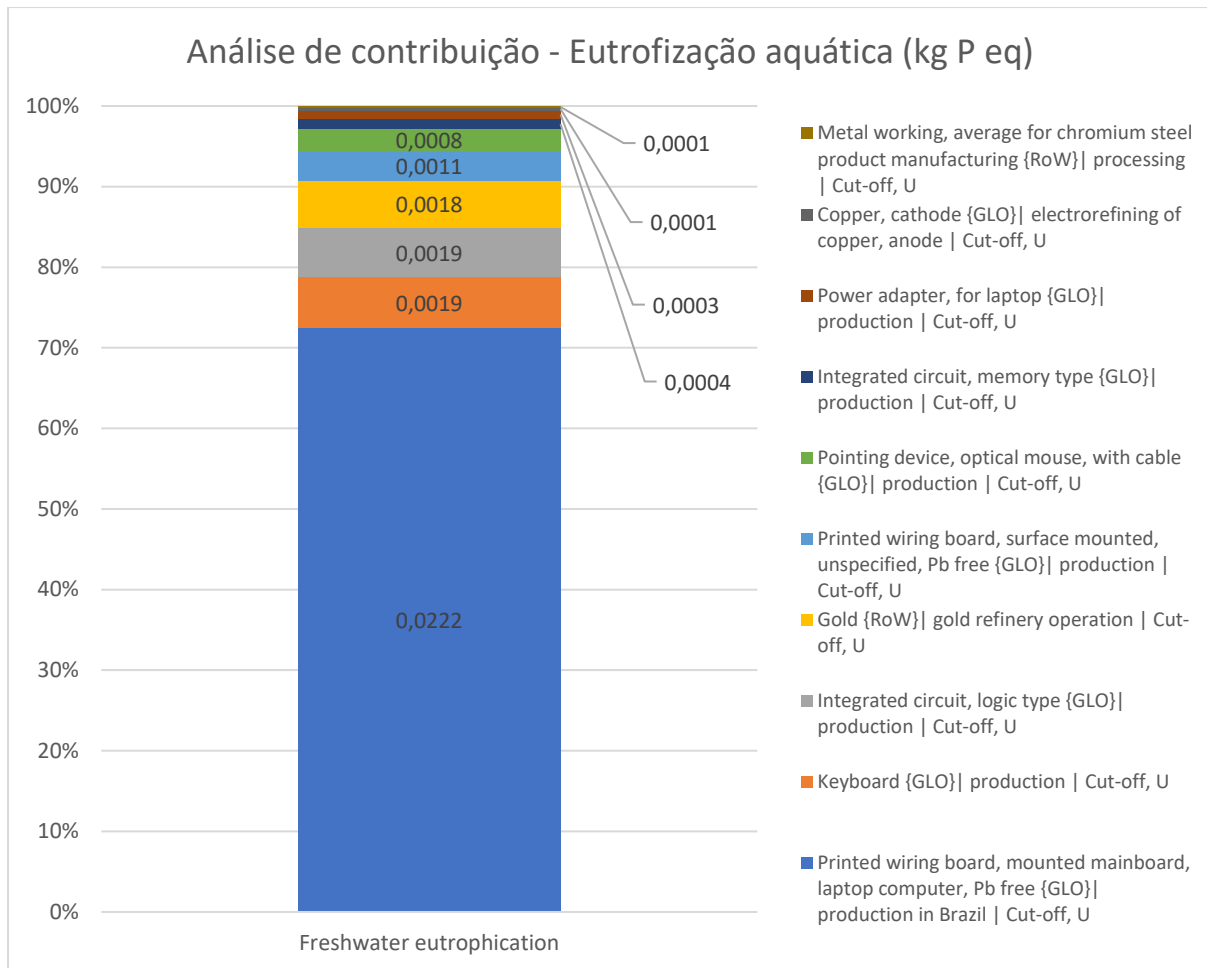


Figura 9 - Análise de contribuição da produção das matérias-primas - Eutrofização aquática

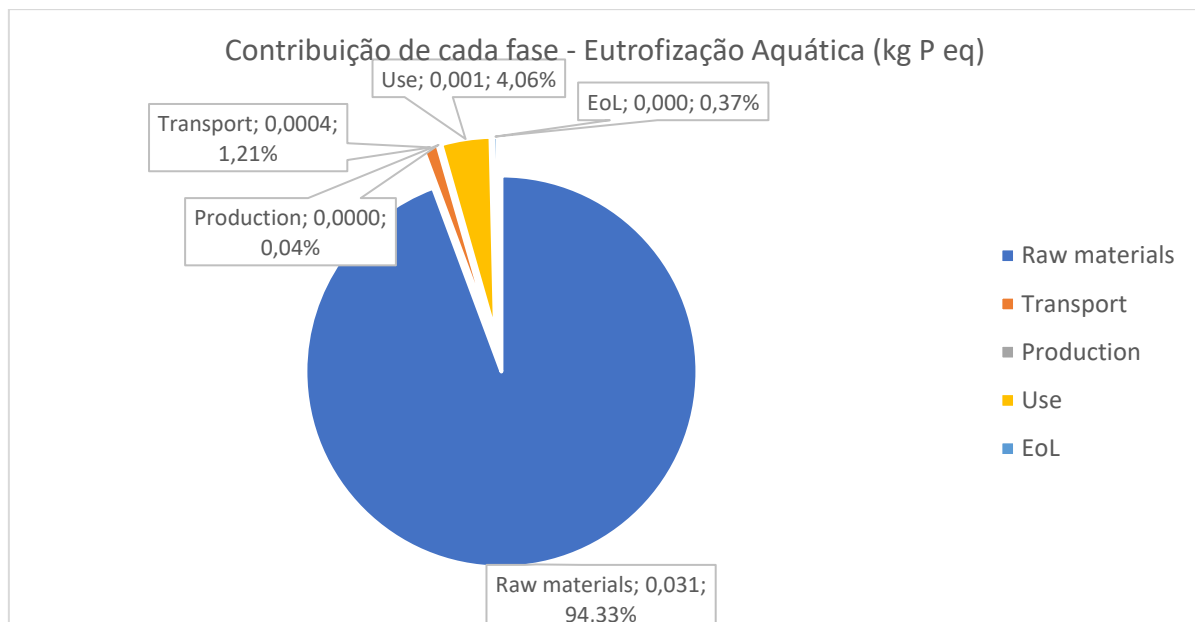


Figura 10 - Análise de contribuição por fases do ciclo de vida - Eutrofização aquática

e) Uso de terra (*Land use*)

O impacto de 9,601 m² de área de produção equivalente (m²a eq) em uma Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) representa o uso de terra necessário para sustentar o ciclo de vida completo de um produto — nesse caso, o uso de solo transformado ou ocupado ao longo do tempo, ajustado por fatores como tipo de bioma, biodiversidade, produtividade e duração da ocupação.

Um valor desta magnitude pode estar associado a uma cadeia de suprimentos com grande dependência de matérias-primas de mineração a céu aberto, por exemplo, que consomem mais solo (MILÀ I CANALS, L *et al*, 2007).

Na categoria de uso da terra, as fases de matéria-prima e uso foram as principais contribuintes, com 26,86% e 71,72% dos impactos, respectivamente. A contribuição da fase de uso está relacionada, principalmente, à adoção da matriz energética brasileira, que é majoritariamente renovável, mas cuja composição inclui fontes como hidrelétricas e biomassa. Essas tecnologias, embora tenham baixa emissão de gases de efeito estufa, estão associadas a altas demandas por área ocupada, seja para a formação de reservatórios, no caso das hidrelétricas, seja para o cultivo de culturas energéticas. Assim, mesmo com baixo consumo de eletricidade por unidade de tempo, o uso prolongado do desktop ao longo de sua vida útil resulta em impactos acumulados significativos nessa categoria.

Já a fase de produção de matérias-primas apresenta impacto relevante devido à ocupação e transformação do solo associadas à extração de recursos naturais e à fabricação de componentes eletrônicos, que demandam tanto a mineração de metais quanto a instalação de estruturas industriais com significativa interferência em áreas naturais. Esses processos contribuem para a redução da biodiversidade e a alteração de ecossistemas, refletindo-se no indicador de uso da terra.

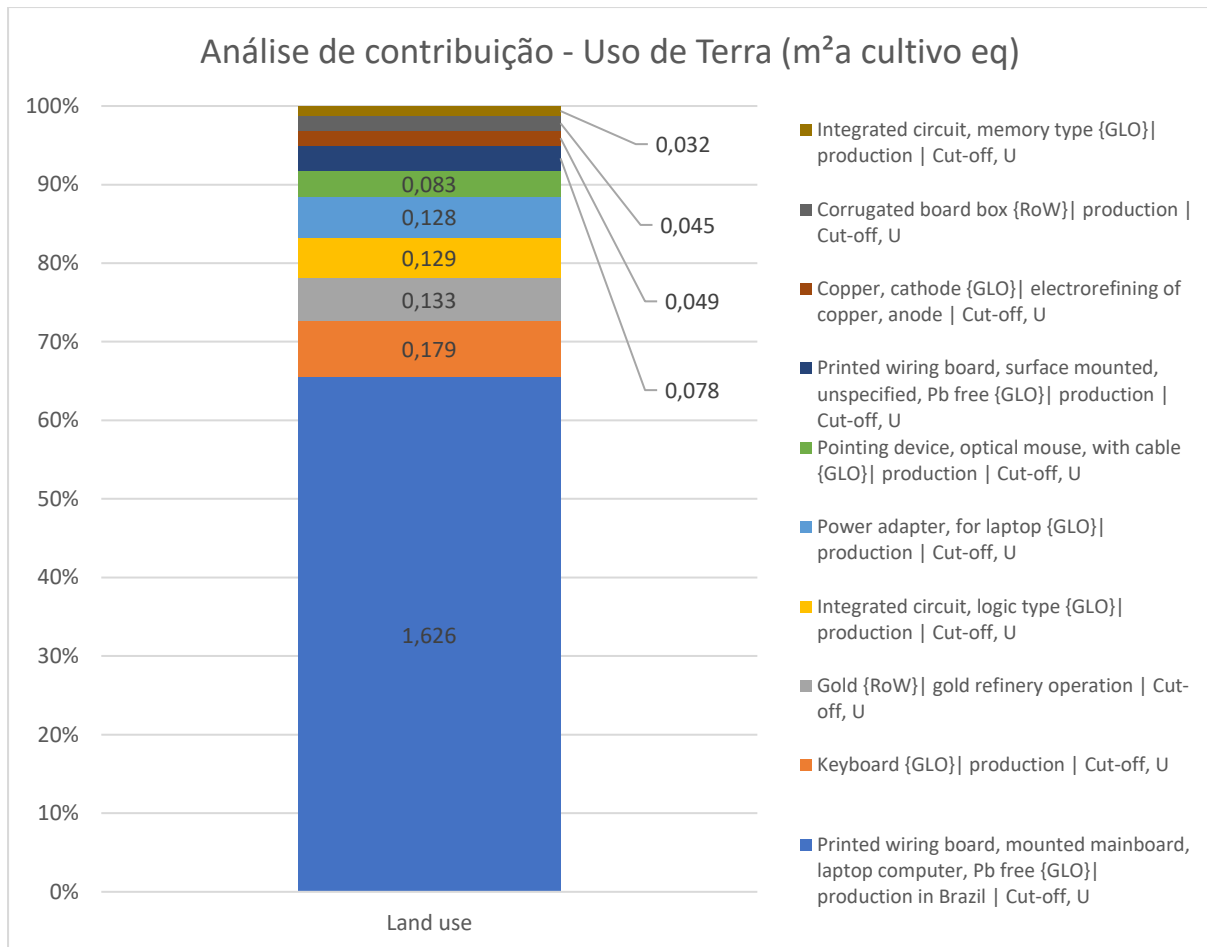


Figura 11 - Análise de contribuição da produção das matérias-primas - Uso de terra

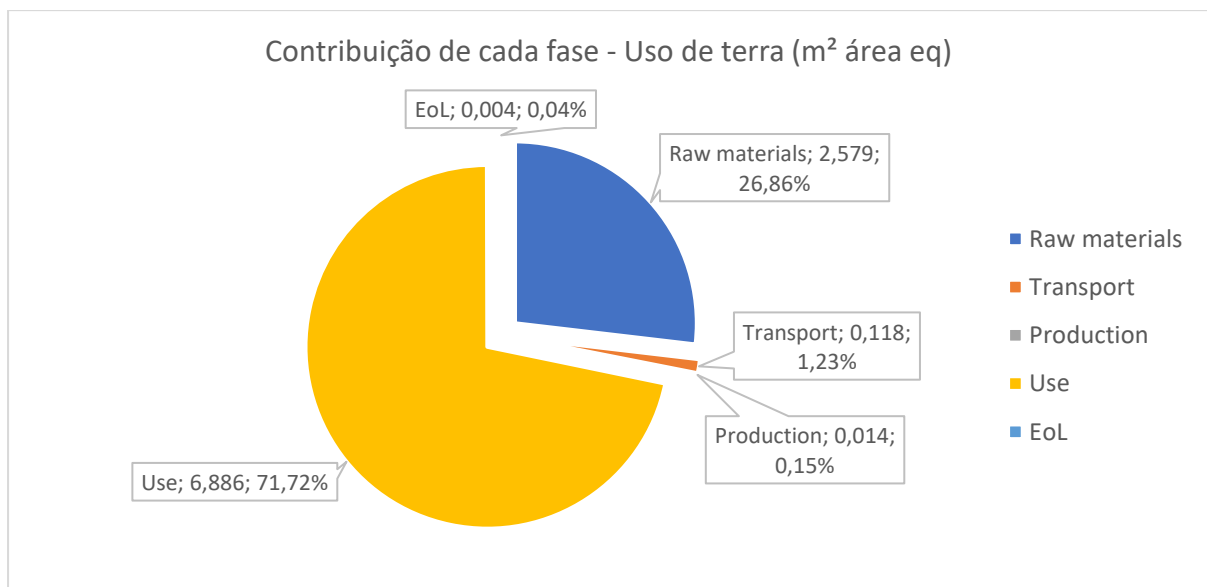


Figura 12 - Análise de contribuição por fases do ciclo de vida – Uso de terra

f) Escassez de recursos minerais (*Mineral resource scarcity*)

Esse valor representa a quantidade de cobre equivalente necessário ao longo do ciclo de vida de um desktop, refletindo a pressão sobre recursos minerais escassos. O cobre é usado como referência por ser amplamente utilizado e de grande importância econômica.

Na categoria de escassez de recursos minerais, o resultado de 4,974 kg Cu eq é compatível com a elevada presença de componentes metálicos no desktop, especialmente na fase de produção de matérias-primas, que responde por mais de 99,82% dos impactos. Isso reflete a intensa dependência de metais como cobre, alumínio e elementos raros na fabricação dos componentes eletrônicos. A fase de uso, por sua vez, apresentou impacto marginal, com 0,18%, devido à ausência de consumo direto de materiais minerais durante a operação do equipamento.

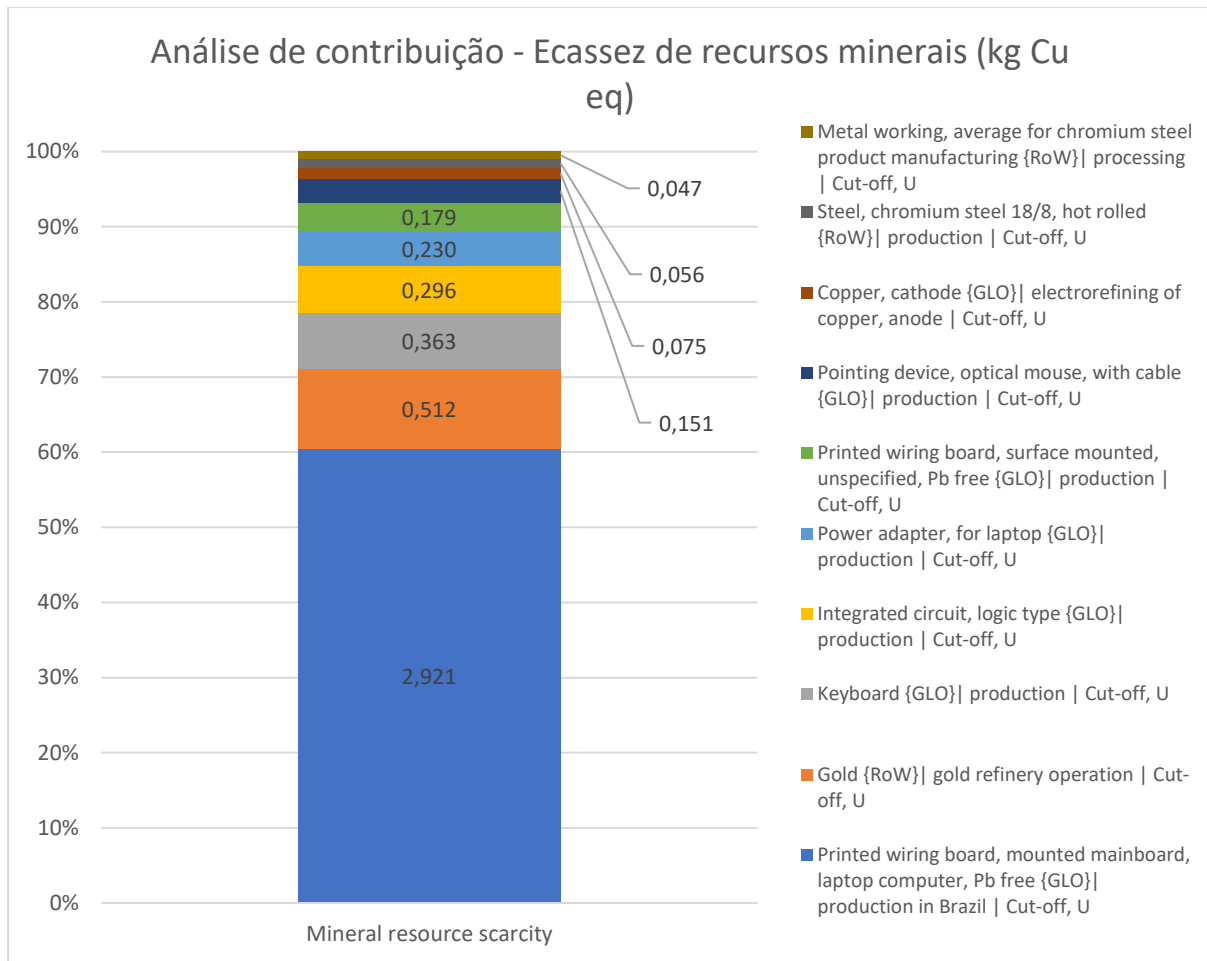


Figura 13 - Análise de contribuição da produção das matérias-primas - Escassez de recursos minerais

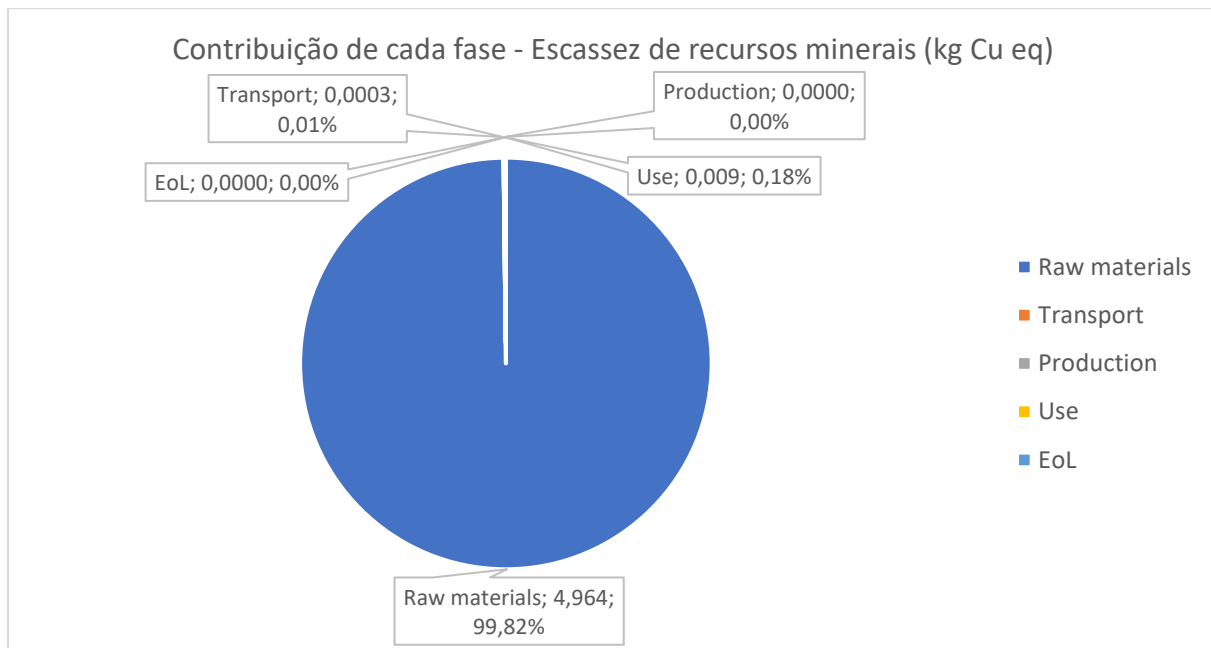


Figura 14 - Análise de contribuição por fases do ciclo de vida – Escassez de recursos minerais

g) Escassez de recursos fósseis (*Fossil resource scarcity*)

Representa o total de recursos fósseis consumidos para produzir, utilizar e descartar um desktop. Inclui petróleo, gás natural e carvão. O resultado de 57,076 kg oil eq equivale a cerca de 67,1 litros de petróleo bruto (0,85kg/L), uma medida moderada se comparada à pegada média de 260 kg de combustíveis fósseis utilizados na fabricação de um desktop com monitor CRT de 17" (Williams, 2004).

Na categoria de escassez de recursos fósseis, os maiores impactos concentram-se nas fases de produção de matérias-primas (67,59%) e uso (30,17%), reflexo do alto consumo de combustíveis fósseis em processos industriais e na geração de eletricidade. A fase de transporte, embora frequentemente relevante nessa categoria, representou apenas 2,01% dos impactos no presente estudo, indicando menor participação relativa dos modais logísticos frente às demais etapas do ciclo de vida.

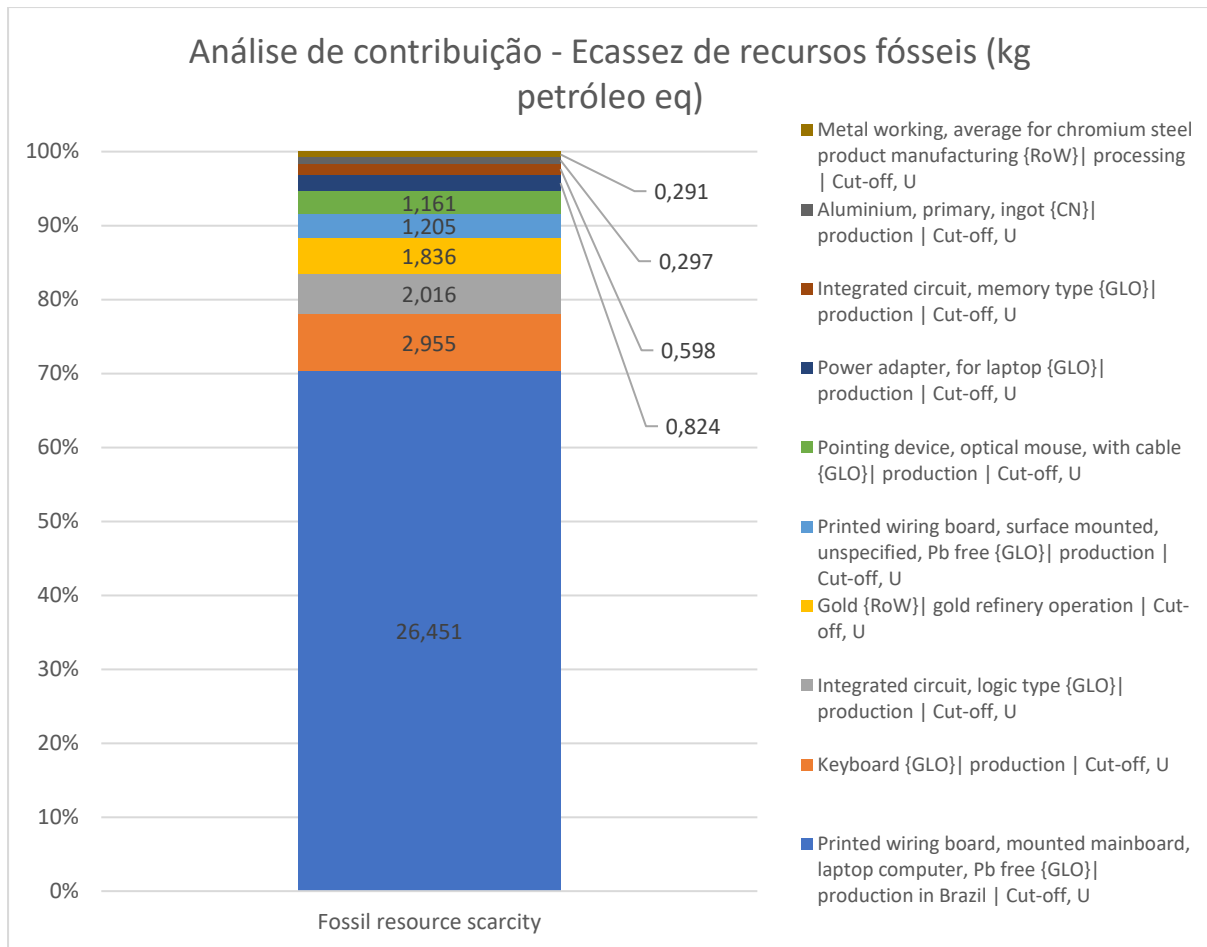


Figura 15 - Análise de contribuição da produção das matérias-primas - Escassez de recursos fósseis

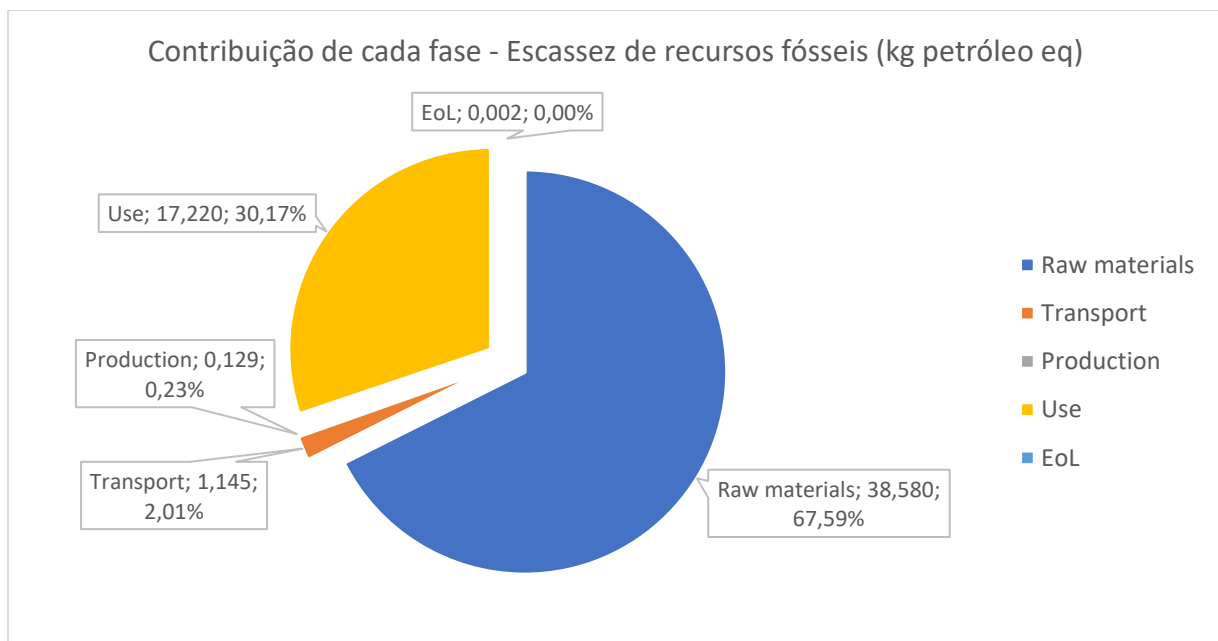


Figura 16 - Análise de contribuição por fases do ciclo de vida - Escassez de recursos fósseis.

h) Consumo de água (*Water consumption*)

O resultado nesta categoria é de 7,81m³, o equivalente a 7810 Litros de água usados ao longo do ciclo de vida do berço ao túmulo. Os mesmos componentes principais compõe a maior parcela do impacto na fase de matéria-prima nesta categoria.

Estudos anteriores que avaliam o ciclo de vida de notebooks relatam um consumo de água entre 800 e 1.200 litros por unidade (DENG et al., 2011). Embora o desktop avaliado neste estudo apresente maior massa e complexidade de materiais, o resultado obtido é significativamente superior, o que indica a necessidade de atenção especial à fase de uso, que respondeu por 80,78% do impacto total nessa categoria. Esse valor expressivo pode ser atribuído à forte dependência da matriz energética brasileira por fontes hidrelétricas, responsáveis por grande parte do consumo indireto de água.

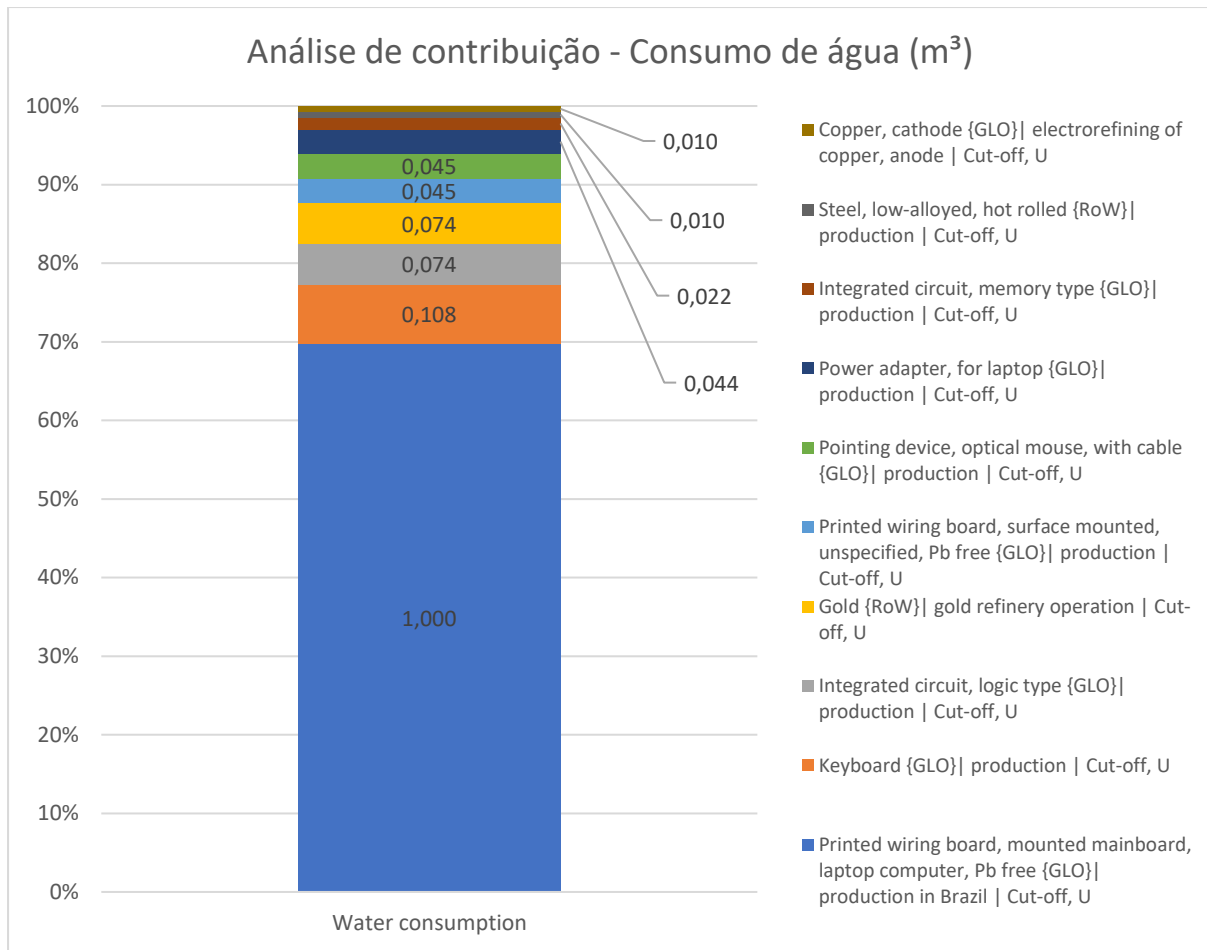


Figura 17 - Análise de contribuição da produção das matérias-primas - Consumo de água

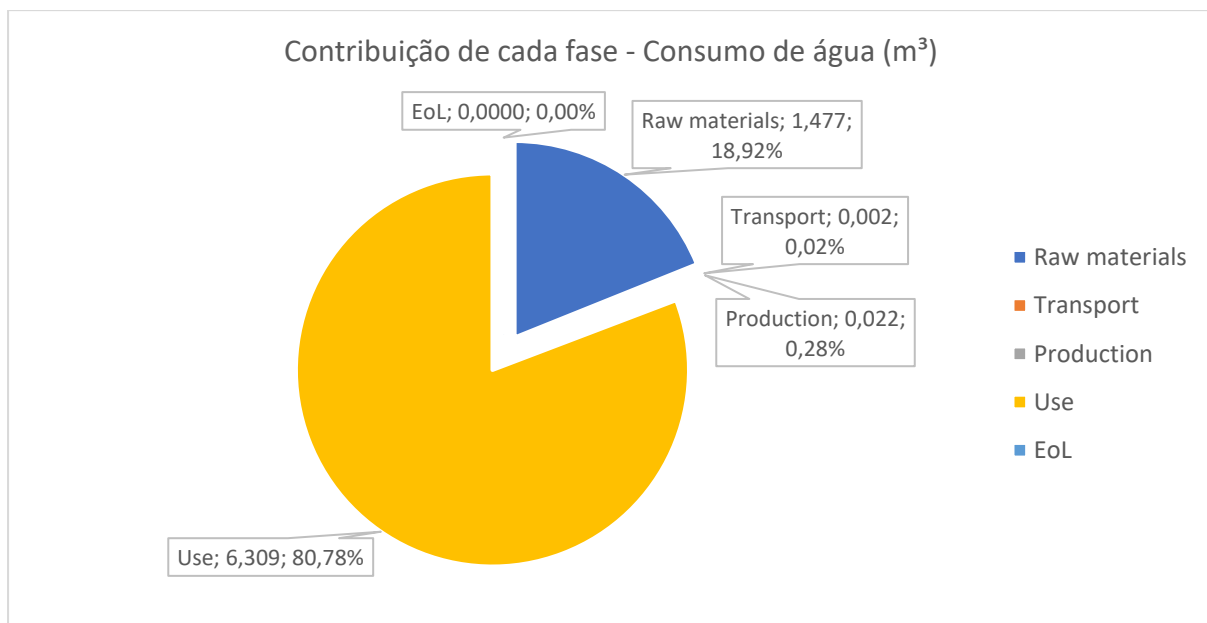


Figura 18 - Análise de contribuição por fases do ciclo de vida - Consumo de água

i) Demanda Cumulativa de Energia (*Cumulative Energy Demand (CED)*)

A categoria de Demanda Cumulativa de Energia (CED) quantifica a energia total requerida ao longo de todas as fases do ciclo de vida do produto, incluindo fontes renováveis e não renováveis. O resultado obtido foi de 4.291,65 MJ, equivalente a 1.193,67 kWh, valor que reflete o consumo energético incorporado desde a extração de matérias-primas até a disposição final. A fase de produção de matérias-primas foi a principal contribuinte, com 52,67% do total, devido à elevada demanda energética envolvida nos processos de mineração e beneficiamento de minerais metálicos, amplamente utilizados na fabricação de componentes como placas-mãe, memória RAM e SSD.

A fase de uso apresentou a segunda maior contribuição, com 45,87%, associada ao consumo contínuo de energia elétrica durante a operação do equipamento ao longo de sua vida útil. Esse padrão é coerente com a natureza funcional do produto, que depende diretamente de eletricidade para desempenhar sua função. Segundo Teehan & Kandlikar (2013), o ciclo de vida de um desktop pode consumir entre 1.338 e 3.000 MJ, o que confirma a plausibilidade do valor encontrado neste estudo, ainda que indique um impacto relativamente elevado. Isso reforça a importância de considerar estratégias de eficiência energética e extensão da vida útil como caminhos viáveis para mitigar o impacto energético global do produto.

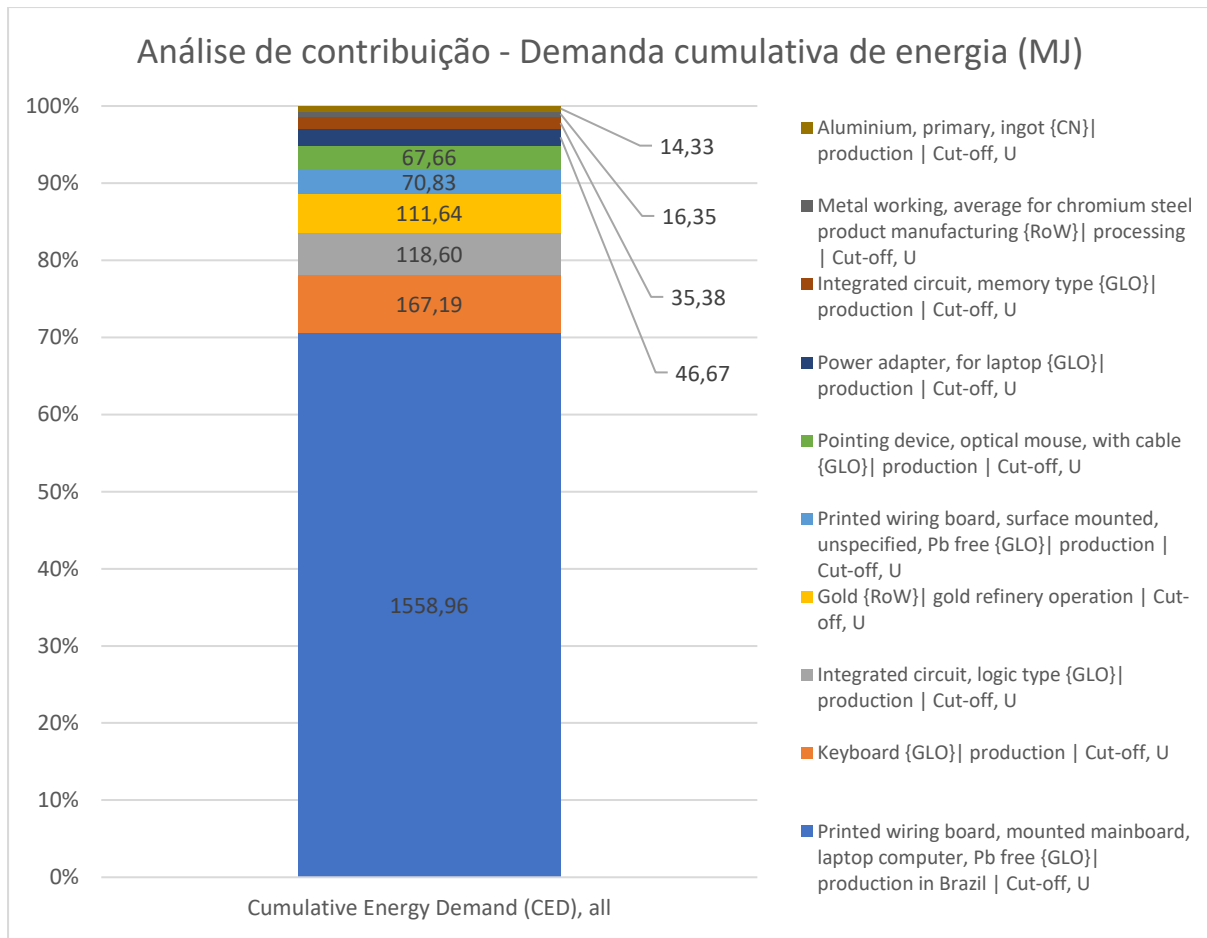


Figura 19 - Análise de contribuição da produção das matérias-primas - Demanda cumulativa de energia

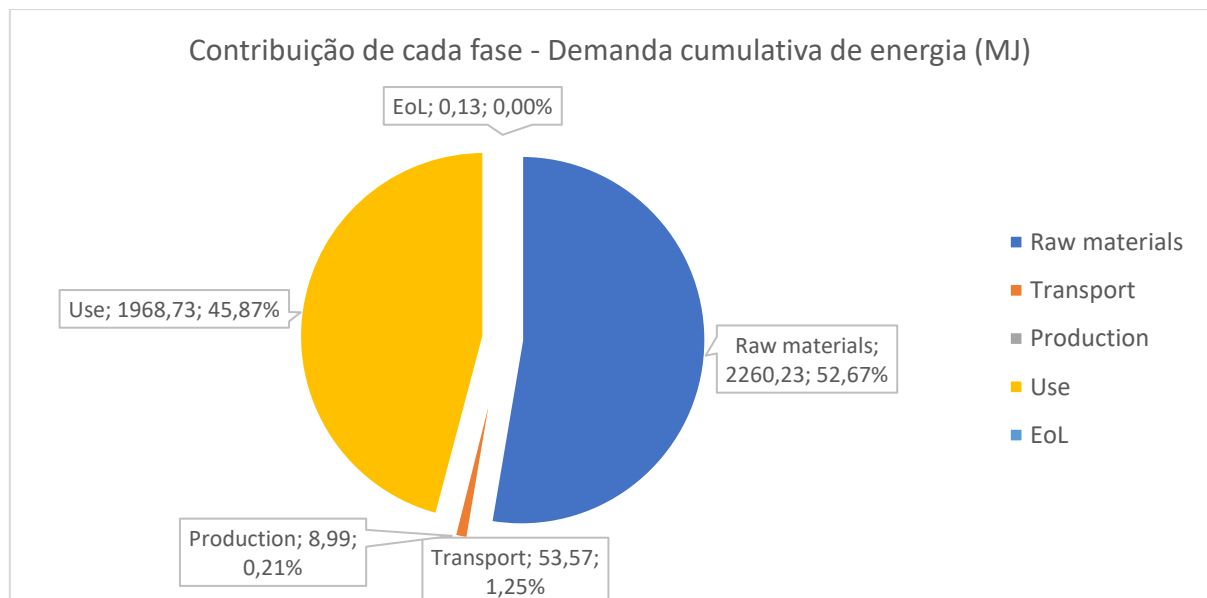


Figura 20 - Análise de contribuição por fases do ciclo de vida - Demanda cumulativa de energia

j) Toxicidade Humana – cancerígeno (*Human toxicity, cancer*)

Esta categoria representa o potencial de causar câncer em humanos devido à exposição a substâncias tóxicas ao longo do ciclo de vida. Embora o número pareça pequeno, ele é significativo em análises comparativas e quando agregado a milhares de unidades.

O resultado de $1,71 \times 10^{-8}$ é plausível, baseado em valores similares reportados em modelos Usetox para produtos eletrônicos variando entre 10^{-9} a 10^{-7} por unidade. Neste estudo, maior parte da carga de impacto (66,57%) está atrelada a fase de fabricação das matérias-primas, através da fabricação dos circuitos impressos e principais componentes metálicos, devido aos impactos à saúde humana do processo de extração das matérias-primas.

Apesar da matriz energética brasileira ser predominantemente renovável e apresentar baixos níveis de emissões diretas associadas à geração de eletricidade, a fase de uso do desktop contribuiu com 32,59% para a categoria de toxicidade humana cancerígeno. Esse resultado pode estar relacionado a emissões indiretas associadas à presença de resíduos e emissões tóxicas em cadeias produtivas associadas ao fornecimento de energia, ainda que em menor proporção. Além disso, o uso prolongado do equipamento ao longo do tempo, mesmo com baixa demanda energética por unidade de tempo, pode acumular impactos relevantes nessa categoria. É importante destacar que esse resultado reflete não apenas o consumo energético em si, mas também os impactos associados ao ciclo de vida da eletricidade consumida, modelados conforme os dados da matriz brasileira no banco ecoinvent.

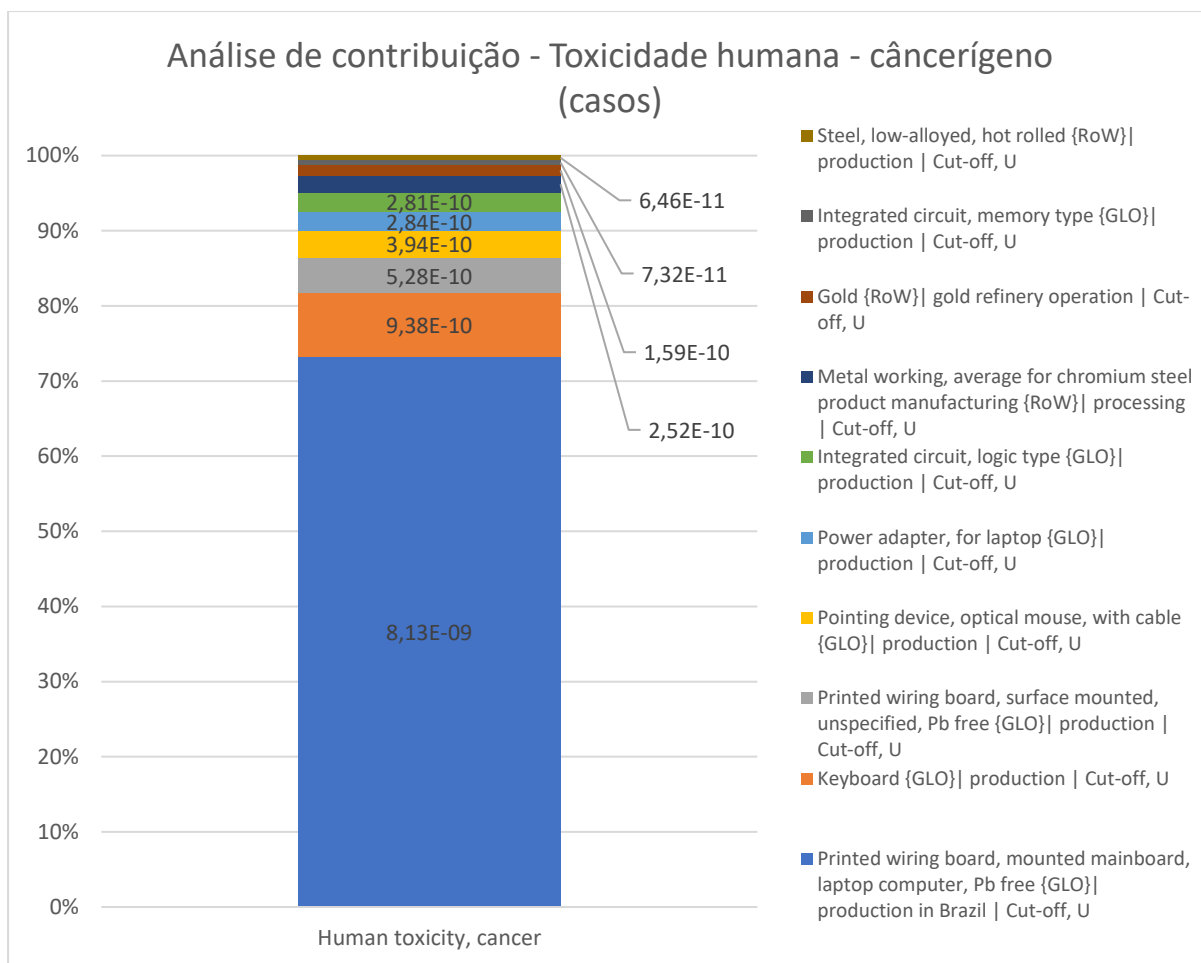


Figura 21 - Análise de contribuição da produção das matérias-primas - Toxicidade humana – cancerígeno

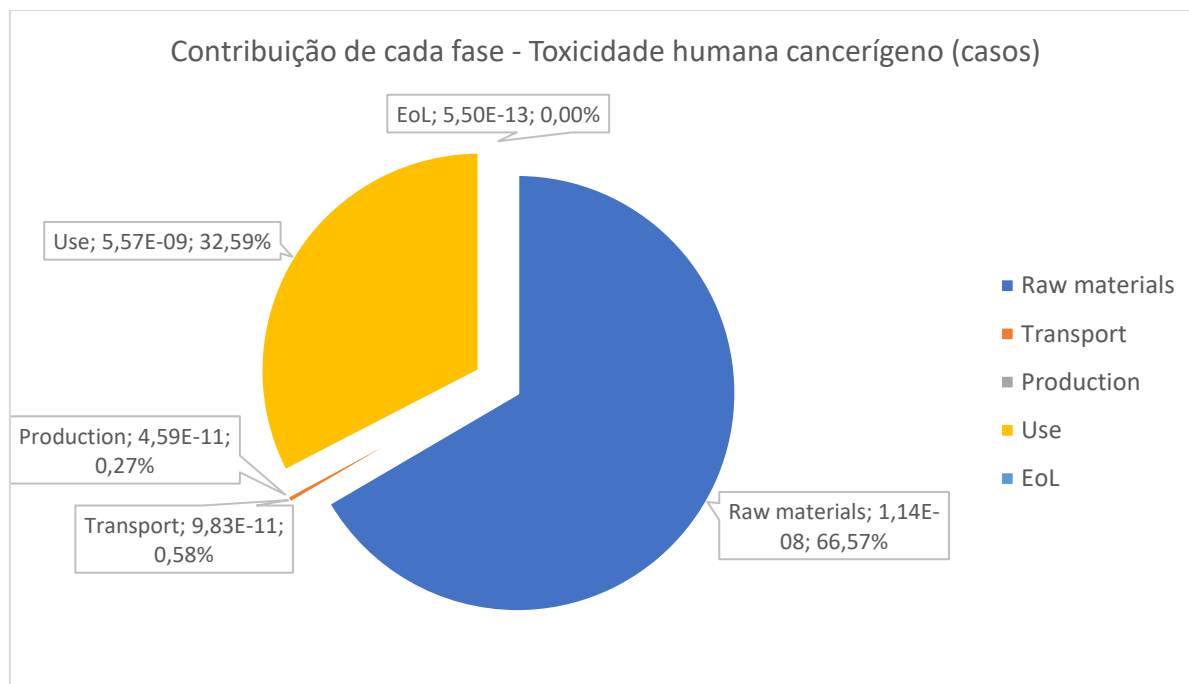


Figura 22 - Análise de contribuição por fases do ciclo de vida - Toxicidade humana – cancerígeno

k) Toxicidade Humana – não-cancerígeno (*Human toxicity, non-cancer*)

Refere-se a doenças ou efeitos não cancerígenos em humanos. Novamente, o valor representa um risco potencial e é útil para comparar diferentes materiais e processos. Na cadeia de produção de eletroeletrônicos, é comum observar uma carga significativa de impacto ambiental associada ao uso de retardantes de chama, especialmente os bromados, e à presença de componentes plásticos complexos. Esses materiais não apenas dificultam o processo de reciclagem, como também contribuem para categorias de impacto como toxicidade humana e ecotoxicidade, devido à liberação de substâncias persistentes e bioacumulativas ao longo do ciclo de vida do produto (JONKERS et al., 2015).

O valor calculado no estudo de $3,39 \times 10^{-9}$ se encontra dentro da faixa de referência encontrada no Usetox, assim como na categoria anterior, apontando um valor ainda mais baixo. Nesta categoria, a fase de produção de matérias-primas respondeu por 60,76%, enquanto a fase de uso do desktop respondeu por 24,47% dos impactos, mesmo com a matriz energética brasileira sendo majoritariamente renovável. Esse resultado se deve principalmente às emissões atmosféricas e aquáticas associadas à geração de eletricidade, como a liberação de metais pesados e compostos orgânicos em processos de queima e tratamento de resíduos em fontes fósseis complementares. Apesar da baixa intensidade média por kWh, o uso contínuo do equipamento ao longo de sua vida útil amplia sua contribuição para essa categoria de impacto.

Já a fase de transportes representou 14,68% dos impactos nessa categoria, influenciada pelas emissões atmosféricas resultantes da queima de combustíveis fósseis nos modais rodoviário, marítimo e aéreo, utilizados nas etapas *upstream* e *downstream*. Compostos como NO_x , hidrocarbonetos e metais pesados presentes nesses processos contribuem significativamente para os efeitos tóxicos não cancerígenos à saúde humana.

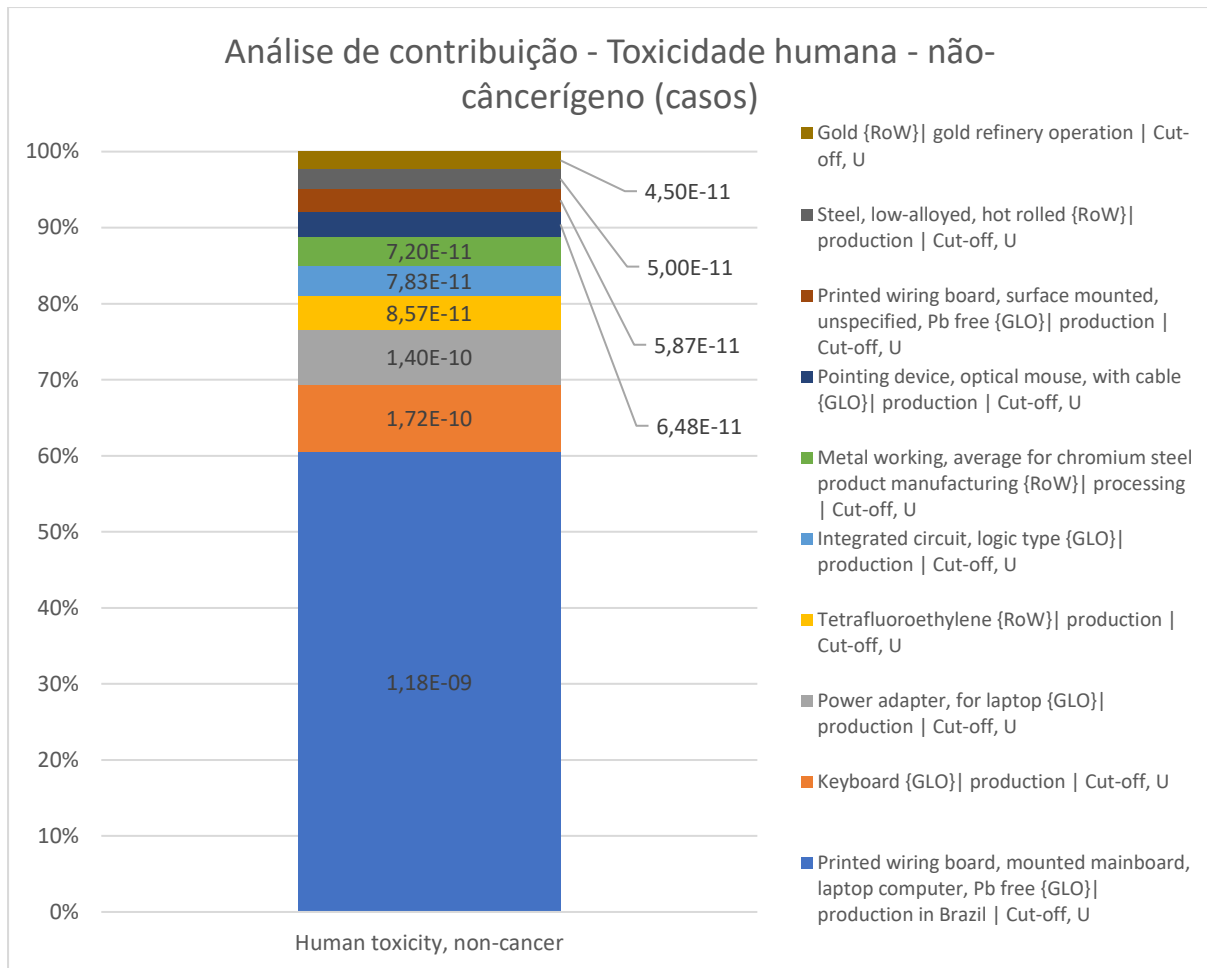


Figura 23 - Análise de contribuição da produção das matérias-primas - Toxicidade humana não-cancerígeno

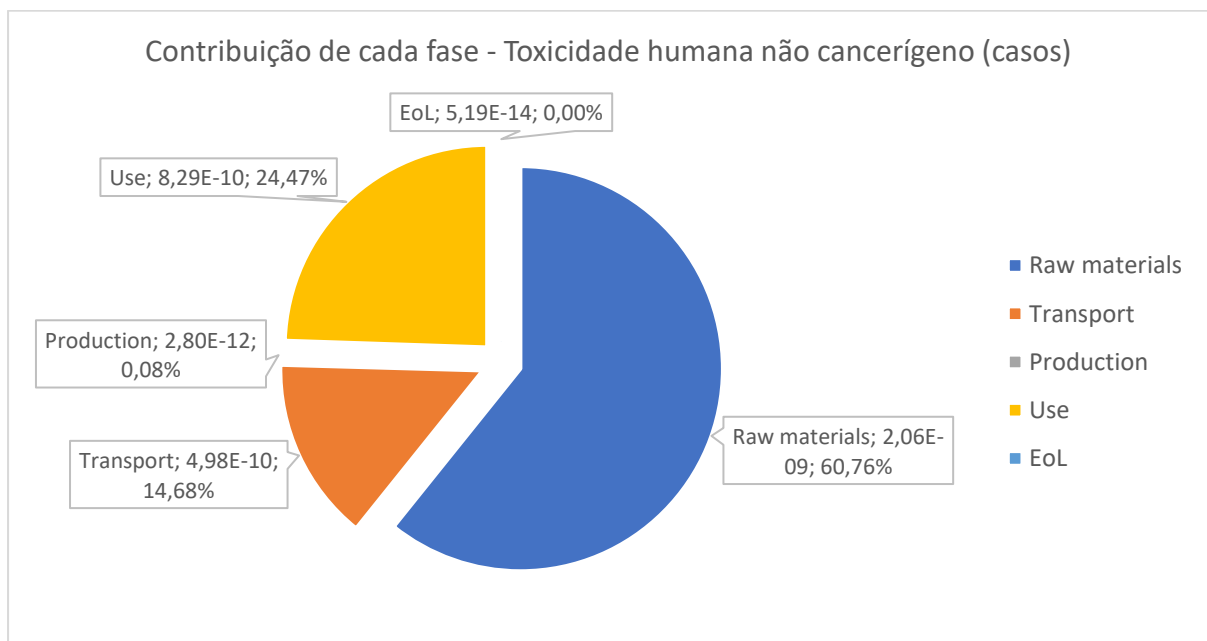


Figura 24 - Análise de contribuição por fases do ciclo de vida - Toxicidade humana – não cancerígeno

I) Ecotoxicidade aquática (*Freshwater ecotoxicity*)

A categoria de ecotoxicidade aquática mede o impacto tóxico potencial de substâncias liberadas em corpos d'água, refletindo a quantidade de água doce afetada por poluentes como metais pesados, solventes e resíduos industriais. No presente estudo, o impacto total foi de 4,118 PAF·m³·dia, sendo a fase de uso a principal responsável, com 66,83% da contribuição. Esse resultado pode ser atribuído a emissões indiretas associadas à geração de eletricidade, como o lançamento de substâncias tóxicas nos ciclos de produção energética, mesmo em uma matriz predominantemente renovável como a brasileira.

A fase de produção de matérias-primas contribuiu com 31,32%, o que indica participação relevante de processos extrativos e industriais na liberação de efluentes tóxicos. Atividades como a mineração e o refino de metais presentes nos componentes eletrônicos do desktop estão entre as principais fontes de ecotoxicidade, dado o uso intensivo de químicos e o potencial de contaminação de corpos hídricos nesses processos.

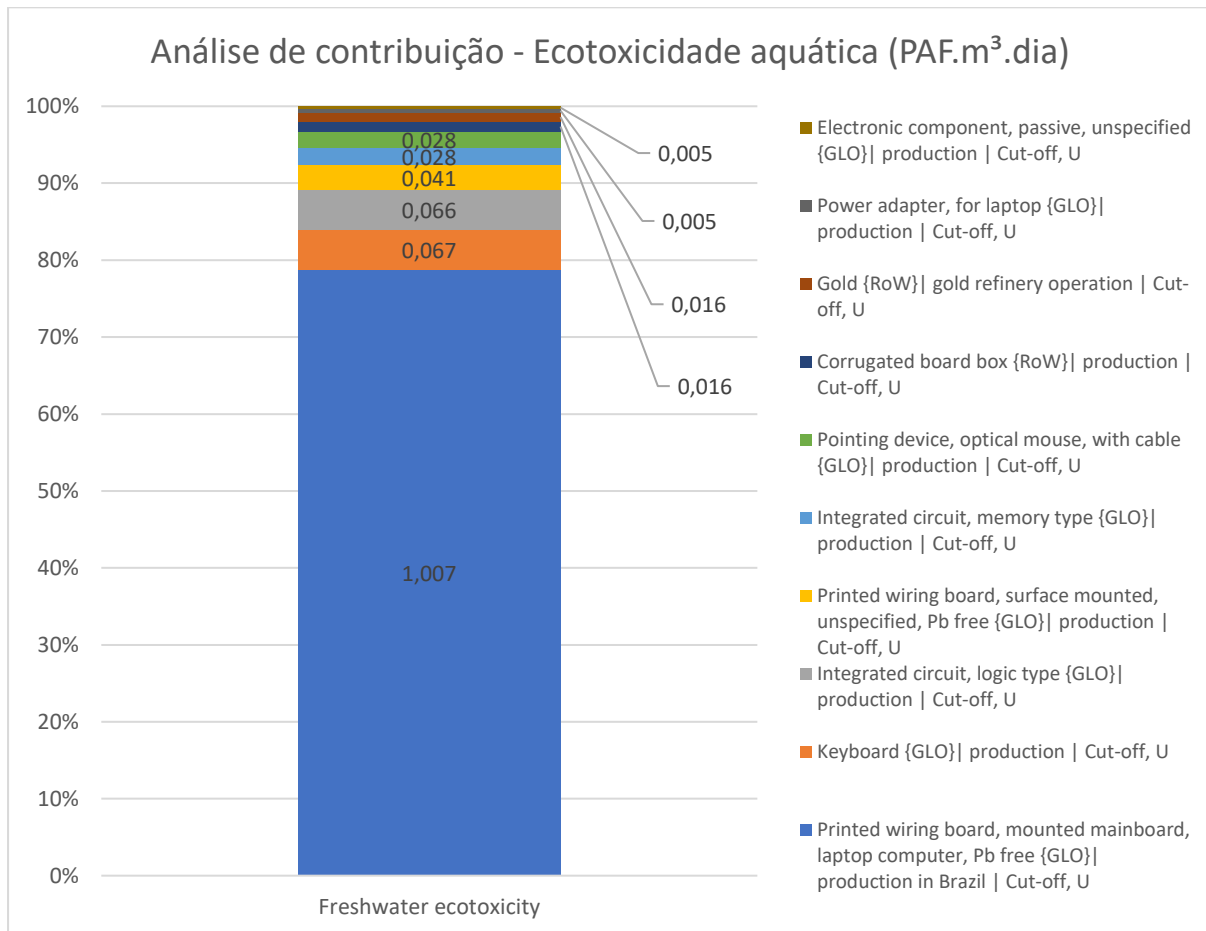


Figura 25 - Análise de contribuição da produção das matérias-primas - Ecotoxicidade aquática

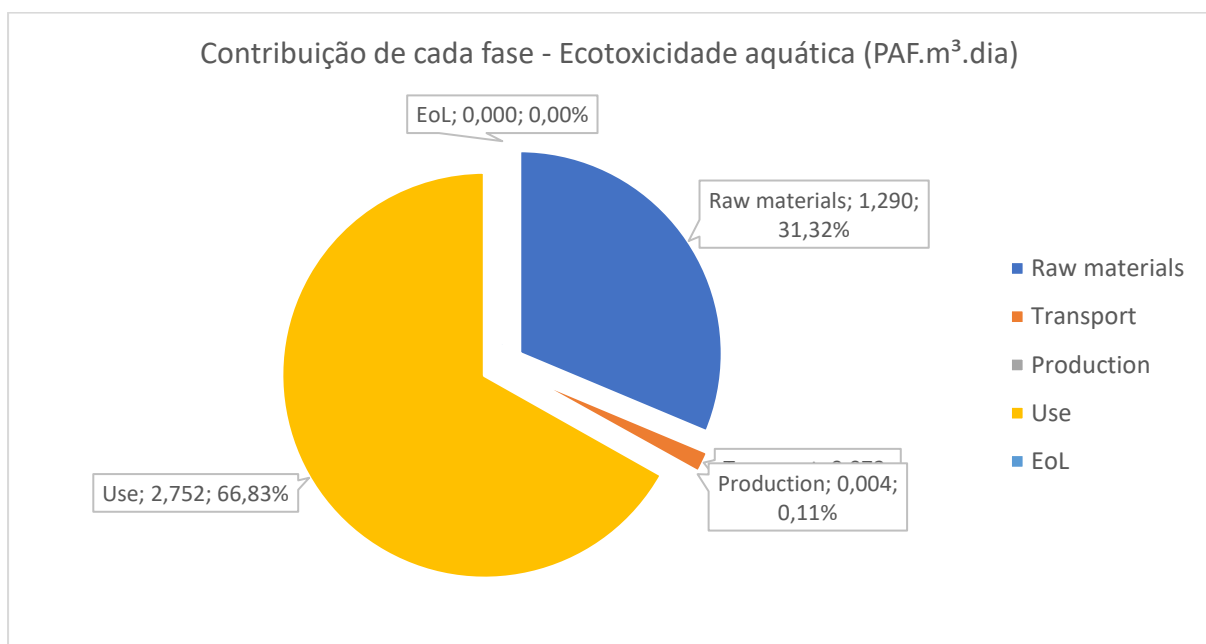


Figura 26 - Análise de contribuição por fases do ciclo de vida – Ecotoxicidade aquática

II. Validação dos dados

A validação dos dados utilizados neste estudo de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) foi conduzida de forma sistemática, com o objetivo de garantir sua confiabilidade, representatividade e aderência ao escopo definido. A qualidade dos dados foi avaliada considerando os critérios descritos na NBR ISO 14044, especialmente quanto à cobertura temporal, geográfica, tecnológica e à coerência metodológica entre os diferentes conjuntos de dados.

Os dados primários relacionados à fabricação do produto foram obtidos diretamente da Positivo Tecnologia, com base em instrumentos de controle interno e planilhas de monitoramento de consumo de energia, água, emissões e geração de resíduos referentes ao ano de 2024. Esses dados são regularmente utilizados pela empresa para fins de reporte ambiental e inventários de Gases de Efeito Estufa (GEE), verificados por terceira parte, o que confere maior robustez e confiabilidade às informações coletadas.

Já os dados secundários foram majoritariamente obtidos do banco de dados ecoinvent® v3.10, reconhecido internacionalmente, com priorização de datasets representativos da realidade geográfica brasileira ou da categoria "Rest of World" (RoW), quando não havia dados específicos disponíveis. As adaptações realizadas buscaram refletir o contexto local de produção e uso, especialmente no que se refere à matriz energética, modais de transporte e processos produtivos regionais.

A consistência dos resultados também foi verificada por meio de comparações com estudos da literatura científica sobre equipamentos eletrônicos similares (ex.: Teehan & Kandlikar, 2013; Choi et al., 2006; Deng et al., 2011). Os valores obtidos para as principais categorias de impacto, como aquecimento global, consumo de energia, escassez de recursos e toxicidade, mostraram-se compatíveis com a faixa de referência encontrada nesses estudos, reforçando a plausibilidade dos resultados obtidos.

Além disso, os métodos utilizados (ReCiPe 2016 Midpoint H, Usetox2 e CED) são amplamente validados e reconhecidos pela comunidade científica e técnica de ACV. A aplicação dessas metodologias foi feita por meio do software SimaPro® v9.4, garantindo rastreabilidade e reprodutibilidade dos cálculos.

Diante dessas evidências, considera-se que a qualidade e representatividade dos dados utilizados são satisfatórias para o cumprimento dos objetivos deste estudo, permitindo uma avaliação ambiental coerente do ciclo de vida do desktop Positivo Master C8400 MiniPro. Ainda assim, reconhece-se que a ausência de dados primários sobre a fase de fim de vida (especialmente processos de reciclagem) e algumas simplificações na modelagem representam limitações que devem ser endereçadas em estudos futuros.

a) Análise de incerteza

Com o objetivo de avaliar a robustez dos resultados obtidos neste estudo, foi realizada uma análise de incerteza por meio de simulação de Monte Carlo, utilizando 1000 iterações no software SimaPro® v9.4, com os parâmetros de incerteza definidos no banco de dados

ecoinvent® v3.10. Essa abordagem permite quantificar a variação estatística dos resultados e identificar as categorias de impacto mais sensíveis às incertezas nos dados de entrada.

Os resultados da simulação são apresentados na Tabela 15, contendo as médias, desvios padrão, coeficientes de variação (CV) e os intervalos de confiança de 95% para cada categoria de impacto. Observa-se que as categorias com maior variabilidade relativa foram Eutrofização de água doce (CV = 19,7%) e Depleção de Ozônio Estratosférico (CV = 18,2%), o que indica maior sensibilidade a incertezas nos dados de inventário associados a fluxos de nutrientes e substâncias tóxicas. Por outro lado, categorias como Aquecimento Global (CV = 5,7%) e Demanda Cumulativa de Energia (CV = 6,1%) apresentaram variabilidade moderada, indicando resultados mais estáveis. Esses valores reforçam a confiabilidade geral do modelo, ao mesmo tempo em que apontam as áreas com maior incerteza relativa, especialmente ligadas ao tratamento de resíduos, uso de água e emissões indiretas.

Tabela 15 - Resultados da simulação de Monte Carlo

Categoria	Unidade	Média	Desvio padrão (SD)	Coeficiente de variação (CV) %	Intervalo de confiança 95% (2,5% - 97,5%)
Aquecimento global (<i>Global warming</i>)	kg CO ₂ eq	231,645	13,200	5,698	206,949 – 259,0
Depleção de ozônio estratosférico (<i>Stratospheric ozone depletion</i>)	kg CFC11 eq	2,74E-04	4,99E-05	1,82E+01	2,09E-04 – 4,01E-04
Acidificação terrestre (<i>Terrestrial acidification</i>)	kg SO ₂ eq	1,067	0,056	5,267	0,961 – 1,179
Eutrofização aquática (<i>Freshwater eutrophication</i>)	kg P eq	0,229	0,045	19,724	0,163 – 0,338
Uso de terra (<i>Land use</i>)	m ² área de produção eq	9,604	1,024	10,661	7,732 – 12,051
Escassez de recursos minerais (<i>Mineral resource scarcity</i>)	kg Cu eq	5,002	0,456	9,111	4,219 – 5,987
Escassez de recursos fósseis (<i>Fossil resource scarcity</i>)	kg petróleo bruto eq	57,697	3,497	6,060	51,390 – 64,984
Consumo de água (<i>Water consumption</i>)	m ³	11,820	185,994	1573,585	-368,700 – 365,449
Demanda cumulativa de energia (<i>Cumulative Energy Demand (CED)</i>)	MJ	4324,416	262,077	6,060	3840,676 – 4839,408
Toxicidade Humana (<i>Human toxicity, câncer</i>)	casos	1,71E-08	2,01E-09	1,18E+01	1,35E-08 – 2,16E-08
Toxicidade Humana (<i>Human toxicity, non-câncer</i>)	casos	3,53E-09	2,59E-10	7,34E+00	3,08E-09 – 4,11E-09
Ecotoxicidade aquática (<i>Freshwater ecotoxicity</i>)	PAF.m3.dia	4,092	0,433	10,582	3,318 – 5,065

III. Análises de sensibilidade

De acordo com os critérios da ISO 14044, com o objetivo de ampliar a robustez dos resultados obtidos e avaliar a influência de diferentes condições operacionais sobre os impactos ambientais do produto, foram conduzidas duas análises de sensibilidade. A primeira considera a inclusão de um monitor LCD durante a fase de uso, uma vez que este é um periférico comumente acoplado ao desktop e que pode representar parcela significativa do consumo energético total. Para essa simulação, foram utilizados dados secundários representativos de um monitor de 15 polegadas disponível no banco de dados ecoinvent® 3.10, considerando seu funcionamento contínuo ao longo do mesmo período de vida útil do desktop.

A segunda análise considera um cenário de extensão da vida útil do desktop para sete anos, viabilizada por ações de manutenção e *retrofit*. Nesse contexto, foram incorporadas substituições parciais de componentes como SSD, memória RAM, fonte de alimentação e sistema de ventilação, além da inclusão de materiais auxiliares utilizados nos serviços de manutenção técnica. O consumo de energia elétrica também foi ajustado proporcionalmente ao novo tempo de uso.

Ambas as análises foram comparadas ao cenário base e os resultados consolidados são apresentados nas tabelas e gráficos em cada subcapítulo abaixo, permitindo observar variações nas categorias de impacto e identificar possíveis oportunidades de melhoria ambiental ao longo do ciclo de vida.

a) Uso de monitor LCD

A primeira análise de sensibilidade tem como objetivo avaliar o impacto ambiental adicional gerado pela inclusão de um monitor LCD, periférico comumente utilizado em conjunto com o desktop, mas não considerado no cenário base. Embora o escopo funcional original do estudo esteja centrado no desktop, a simulação busca capturar de forma mais abrangente os impactos reais da fase de uso, especialmente em categorias sensíveis ao consumo de energia, como aquecimento global, toxicidade humana e consumo cumulativo de energia (CED).

Para essa modelagem, foi considerado um monitor de 15 polegadas com consumo médio anual de 38,96 kWh, utilizado diariamente pelo mesmo período de tempo atribuído ao desktop. Os dados foram extraídos do banco ecoinvent® v3.10, categoria "*Liquid crystal display, minor components, auxiliaries and assembly effort {GLO} | production | Cut-off, U*", e integrados à fase de uso e a de transporte, utilizando os mesmos dados adaptados de rotas de transporte de periféricos considerados na modelagem. Para a fase de uso, considerou-se um estudo de eficiência energética de um dos produtos Positivo, mantendo-se a mesma metodologia descrita no subcapítulo 2. IV para cálculo da Emec. Os dados finais calculados são demonstrados nas Tabelas 16 a 18 e Figura 27.

Tabela 16 - Dados utilizados para fase de transporte no cenário com uso de monitor LCD

Modal	Trecho	Distância do trecho (km)	Carga (tonelada)	Distância x massa (t.km)	Dataset utilizado
Aéreo	Hong Kong (HKG) > Campinas (VCP)	18.058	0,003	46,951	Transport, freight, aircraft, long haul {GLO} transport, freight, aircraft, dedicated freight, long haul Cut-off, U
Terrestre	Campinas > Ilhéus	1.756	0,003	5,268	Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO1 {BR} transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO1 Cut-off, U

Tabela 17 - Dados utilizados para fase de uso no cenário com uso de monitor LCD

Emec (kWh/ano)	Tempo de vida útil	Consumo total (kWh)	Dataset utilizado
38,96	5 anos	194,80	Electricity, low voltage {BR} market group for electricity, low voltage Cut-off, U

Os resultados indicam um aumento percentual mínimo de 50% em quase todas as categorias, sendo a menor alteração percebida na categoria escassez de recursos minerais (1%). Em particular, observa-se uma elevação significativa nas categorias aquecimento global e CED, demonstrando que a inclusão de periféricos pode alterar substancialmente o perfil de impacto do sistema. Esse cenário reforça a importância de considerar os periféricos no planejamento e avaliação ambiental de equipamentos computacionais.

A inclusão do monitor em uma análise de sensibilidade revelou-se fundamental para uma compreensão abrangente dos impactos ambientais associados ao uso do produto. Os resultados evidenciaram que, apesar de muitos fabricantes não considerarem o monitor em suas avaliações de ciclo de vida (ACV), este componente exerce uma influência significativa, contribuindo com pelo menos 40% dos impactos em 11 das 12 categorias analisadas. Essa constatação ressalta a importância de incorporar o monitor nas avaliações, uma vez que sua exclusão pode levar a subestimativas consideráveis do impacto ambiental total, comprometendo a efetividade das estratégias de sustentabilidade e a precisão dos estudos realizados na área.

Tabela 18 - Resultados dos impactos ambientais - cenário uso de monitor

Categoria de impacto	Unidade	Cenário base	Cenário monitor LCD	Difere nça %
Aquecimento global (<i>Global warming</i>)	kg CO ₂ eq	228,897	393,041	72%
Depleção de ozônio estratosférico (<i>Stratospheric ozone depletion</i>)	kg CFC11 eq	2,71E-04	4,67E-04	72%

Acidificação terrestre (<i>Terrestrial acidification</i>)	kg SO ₂ eq	1,030	1,664	62%
Eutrofização aquática (<i>Freshwater eutrophication</i>)	kg P eq	0,033	0,066	101%
Uso de terra (<i>Land use</i>)	m ² área de produção eq	9,601	15,169	58%
Escassez de recursos minerais (<i>Mineral resource scarcity</i>)	kg Cu eq	4,974	5,007	1%
Escassez de recursos fósseis (<i>Fossil resource scarcity</i>)	kg petróleo bruto eq	57,076	97,978	72%
Consumo de água (<i>Water consumption</i>)	m ³	7,810	12,545	61%
Demanda cumulativa de energia (<i>Cumulative Energy Demand (CED)</i>)	MJ	4291,648	7141,251	66%
Toxicidade Humana (<i>Human toxicity, câncer</i>)	casos	1,71E-08	2,42E-08	41%
Toxicidade Humana (<i>Human toxicity, non-câncer</i>)	casos	3,39E-09	5,22E-09	54%
Ecotoxicidade aquática (<i>Freshwater ecotoxicity</i>)	PAF.m3.dia	4,118	6,171	50%

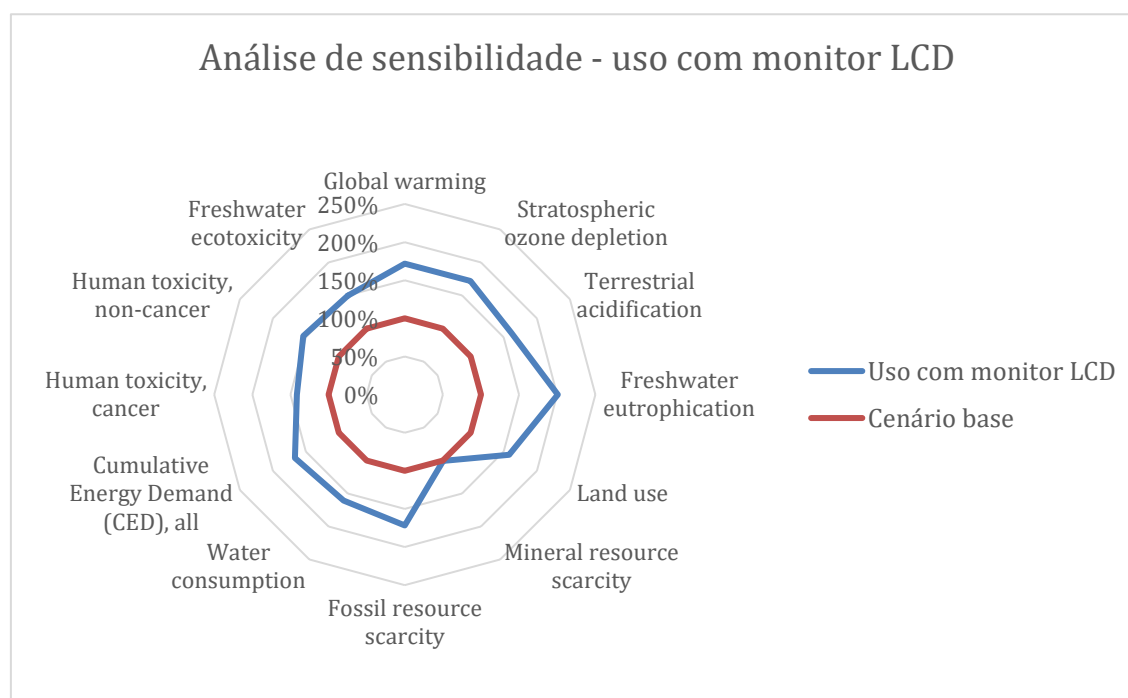


Figura 27 - Resultado comparativo da análise de sensibilidade - uso com monitor LCD

b) Manutenção / extensão da vida útil

A segunda análise de sensibilidade considera um cenário alternativo em que o desktop tem sua vida útil estendida de 5 para 7 anos, viabilizada por ações de manutenção e *retrofit*. Para simular esse cenário, foram incluídas como premissas as substituições de componentes comumente sujeitos a desgaste ou atualização ao longo do tempo, como 1 SSD adicional, 1 memória RAM, 1 fonte de alimentação, e 1 cooler.

Para simular a extensão da vida útil do desktop para 7 anos, foi adotada uma abordagem que considera a diluição dos impactos fixos associados à fabricação do produto. Nesse cenário com vida útil prolongada (7 anos), apenas uma fração de 5/7 dos impactos foi atribuída ao produto para manter a consistência com a vida útil de 5 anos adotada no cenário base. Essa abordagem permite uma comparação mais realista e justa entre o cenário base e o cenário de retrofit, equilibrando o aumento dos impactos acumulados no uso com a diluição dos impactos fixos de produção ao longo do tempo.

Essa abordagem busca verificar se a diluição dos impactos fixos da fabricação ao longo de um período mais longo resulta em melhor desempenho ambiental global.

Tabela 19 - Dados adaptados utilizados na análise de sensibilidade - extensão vida útil

Elemento	Valor adotado	Fonte dos dados	Justificativa
Vida útil	7 anos	Cenário de sensibilidade	Supõe manutenção planejada que permite prolongar a operação além do padrão de 5 anos
Consumo de energia	300,7 kWh	Estudo de eficiência energética	Consumo anual medido multiplicado por período de 5 anos
SSD	1 componente	ecoinvent® 3.10	Substituição após desgaste estimado
Memória RAM	1 componente	ecoinvent® 3.10	Substituição após desgaste estimado
Fonte de alimentação	1 componente	ecoinvent® 3.10	Substituição após desgaste estimado
Cooler	1 componente	ecoinvent® 3.10	Substituição após desgaste estimado

Os resultados, sintetizados no gráfico abaixo, demonstram reduções entre 10 e 20% nos impactos atribuídos ao ciclo de vida, especialmente em categorias como escassez de recursos minerais, eutrofização aquática e aquecimento global, uma vez que os processos industriais deixam de ser concentrados em um ciclo de vida mais curto. Por outro lado, há um leve aumento relativo nos impactos da fase de uso. No balanço geral, o cenário de *retrofit* apresenta um perfil ambiental mais equilibrado, indicando que a extensão da vida útil pode ser uma estratégia ambientalmente vantajosa, sobretudo se combinada a políticas de manutenção planejada e modularidade de componentes.

A inserção da análise de sensibilidade desse cenário se mostra importante para compreensão dos impactos ambientais, por mais que o objetivo se limite ao estudo em 5 anos, pode-se compreender os efeitos da reposição de peças e uso prolongado do equipamento.

Tabela 20 - Resultados dos impactos ambientais - cenário extensão de vida útil

Categoria de impacto	Unidade	Cenário base	Cenário 7 anos	Diferença %
Aquecimento global (<i>Global warming</i>)	kg CO ₂ eq	228,897	197,432	-14%
Depleção de ozônio estratosférico (<i>Stratospheric ozone depletion</i>)	kg CFC11 eq	2,71E-04	2,55E-04	-6%
Acidificação terrestre (<i>Terrestrial acidification</i>)	kg SO ₂ eq	1,030	0,910	-12%

Eutrofização aquática (<i>Freshwater eutrophication</i>)	kg P eq	0,033	0,026	-20%
Uso de terra (<i>Land use</i>)	m ² área de produção eq	9,601	9,122	-5%
Escassez de recursos minerais (<i>Mineral resource scarcity</i>)	kg Cu eq	4,974	4,111	-17%
Escassez de recursos fósseis (<i>Fossil resource scarcity</i>)	kg petróleo bruto eq	57,076	49,150	-14%
Consumo de água (<i>Water consumption</i>)	m ³	7,810	7,531	-4%
Demanda cumulativa de energia (<i>Cumulative Energy Demand (CED)</i>)	MJ	4291,648	3829,568	-11%
Toxicidade Humana (<i>Human toxicity, câncer</i>)	casos	1,71E-08	1,46E-08	-15%
Toxicidade Humana (<i>Human toxicity, non-câncer</i>)	casos	3,39E-09	2,91E-09	-14%
Ecotoxicidade aquática (<i>Freshwater ecotoxicity</i>)	PAF.m3.dia	4,118	3,828	-7%

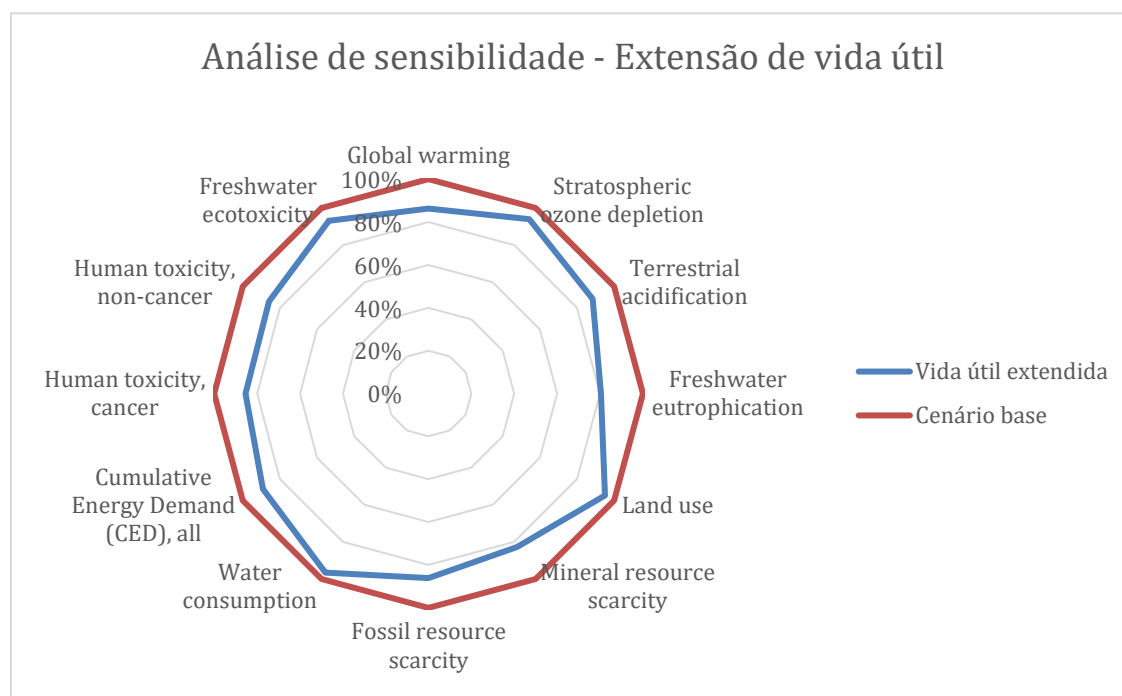


Figura 28 - Resultado comparativo da análise de sensibilidade – extensão da vida útil

4. INTERPRETAÇÃO E CONCLUSÕES

1. O impacto em aquecimento global do produto trouxe um resultado de 228,897 kgCO₂eq, com mais de 60% da pegada estando atrelada aos componentes principais do produto (placa-mãe, memória RAM, SSD e periféricos).
2. A fase de uso demonstrou uma grande participação no impacto ambiental na categoria aquecimento global (31%). O resultado é baixo quando comparado a outros estudos de equipamentos eletroeletrônicos, com valores variando de 55 a 72% (Trinh; Giao, 2021). Isso pode ser explicado devido a matriz energética brasileira utilizada no estudo, majoritariamente renovável.
3. Os transportes logísticos não demonstraram ser grandes ofensores frente as outras etapas, contribuindo em apenas 0-2% na maioria das categorias. Apenas na categoria Toxicidade humana – não cancerígeno, há uma parcela relevante de 14,7% atrelada a essa fase.
4. A fase de fim de vida apresentou baixa contribuição para os impactos ambientais avaliados. No entanto, a ausência de dados primários sobre processos de reciclagem constitui uma limitação na qualidade da modelagem, uma vez que apenas a disposição em aterro sanitário foi considerada. Estudos futuros com dados mais representativos podem aprimorar essa etapa, possibilitando a inclusão de rotas de reciclagem e, potencialmente, a redução dos impactos estimados em diversas categorias.
5. Os componentes que contém placas de circuito impresso foram responsáveis por mais de 70% do impacto na fase de matéria-prima em todas as categorias analisadas.
6. Os materiais plásticos envolvidos na composição do produto não se mostraram tão relevantes para a magnitude das pegadas de impacto.
7. Alguns dos resultados foram comparados a resultados de literatura e benchmark com outros produtos similares na indústria e demonstraram valores em faixas plausíveis, corroborando a validade dos métodos aplicados.
8. A adição do monitor na análise de sensibilidade resultou em aumento expressivo nas categorias relacionadas ao consumo energético, como aquecimento global (72%) e CED (66%), reforçando a importância de considerar periféricos no inventário quando se avalia o impacto ambiental completo de estações de trabalho.
9. A ampliação do tempo de uso para 7 anos levou à redução dos impactos proporcionais da fase de produção, evidenciando que estratégias de manutenção e substituição pontual de componentes podem melhorar o desempenho ambiental global do desktop.

Os resultados desta ACV, aliados às análises de sensibilidade realizadas, sugerem a possibilidade de aprofundar os esforços corporativos da Positivo, rumo a produtos e processos industriais mais sustentáveis, em algumas frentes principais:

1. Foco ampliado na etapa de manufatura e cadeia de suprimentos dos componentes

Os maiores impactos ambientais, especialmente na categoria de Aquecimento Global, estão concentrados na fabricação de componentes eletrônicos, como placa-mãe, SSD e memória RAM. Assim, recomenda-se priorizar, em estudos futuros, uma investigação mais detalhada sobre os processos industriais e cadeias de fornecimento associados a esses componentes, com ênfase em fontes primárias de dados ou modelos específicos por tecnologia e localização geográfica.

2. Avaliação de estratégias de extensão da vida útil

Sob a perspectiva pós-consumo, estratégias como a manutenção ou retrofit de produtos, especialmente de unidades como SSD e memória RAM, podem ser exploradas como alternativas para reduzir a necessidade de fabricação de novos itens e, consequentemente, os impactos associados. A implementação de políticas de design para reutilização ou design modular pode viabilizar essa abordagem no futuro.

3. Incentivo ao aprimoramento da eficiência energética na fase de uso

Dado o destaque da fase de uso nos resultados de diversas categorias de impacto, recomenda-se que futuros estudos e iniciativas considerem estratégias para aumentar a eficiência energética dos desktops, como a adoção de componentes com menor consumo elétrico, melhorias no gerenciamento de energia e incentivo ao uso de equipamentos com certificações de desempenho energético. Essas medidas podem reduzir significativamente os impactos ambientais acumulados ao longo da vida útil do produto.

4. Aprofundamento na modelagem do fim de vida

Embora o fim de vida esteja contemplado no escopo deste estudo, recomenda-se que futuras análises aprofundem os impactos e potenciais benefícios associados à reciclagem e recuperação de materiais, especialmente metais raros e componentes com elevado impacto ambiental, com o uso de dados mais representativos e regionais.

5. REFERÊNCIAS

ABIPLAST. Associação Brasileira da Indústria do Plástico. Reciclagem de plásticos no Brasil: estudo aponta índice de 24,3% para as embalagens em 2023. São Paulo: ABIPLAST, 2023. Disponível em: <https://www.abiplast.org.br/noticias/reciclagem-de-plasticos-no-brasil-estudo-aponta-indice-de-243-para-as-embalagens-em-2023/>. Acesso em: 29 maio 2025.

ABNT NBR:ISO, Associação Brasileira de Normas Técnicas. ABNT NBR ISO 14040 (2009) - Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura. Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. Rio de Janeiro - RJ: [s.n.], 2014a. Disponível em: www.abnt.org.br.

_____. ABNT NBR ISO 14044 - Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Requisitos e orientações. . Rio de Janeiro - RJ: [s.n.], 2014b. Disponível em: www.abnt.org.br.

_____. ABNT NBR ISO 14040 (2009) - Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura. Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. Rio de Janeiro - RJ: [s.n.], 2014a. Disponível em: www.abnt.org.br.

BOUAY, A. M. et al. The WULCA consensus characterization model for water scarcity footprints: assessing impacts of water consumption based on available water remaining (AWARE). The International Journal of Life Cycle Assessment, v. 23, p. 368–378, 2018. <https://doi.org/10.1007/s11367-017-1333-8>

CEMPRE. Compromisso Empresarial para Reciclagem. Taxas de Reciclagem no Brasil – 2022. São Paulo: CEMPRE, 2022. Disponível em: <https://cempre.org.br/taxas-de-reciclagem/>. Acesso em: 29 maio 2025.

CHOI, Byung-Chul; SHIN, Hang-Sik; LEE, Su-Yol; HUR, Tak. Life cycle assessment of a personal computer and its effective recycling rate (7 pp). The International Journal of Life Cycle Assessment, v. 11, p. 122–128, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1065/lca2004.12.196>.

DENG, Liqiu; BABBITT, Callie W.; WILLIAMS, Eric D. Economic-balance hybrid LCA extended with uncertainty analysis: case study of a laptop computer. Journal of Cleaner Production, v. 19, n. 11, p. 1198–1206, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.03.004>.

EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY (EEA). Effects of air pollution on European ecosystems: past and future exposure to acidifying and eutrophying air pollutants. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2014. (EEA Technical report No 11/2014). Disponível em: <https://www.eea.europa.eu/publications/effects-of-air-pollution-on>. Acesso em: 7 maio 2025.

FRISCHKNECHT, R. et al. Implementation of life cycle impact assessment methods – Data v2.0. Ecoinvent Report No. 3. Dübendorf: Swiss Centre for Life Cycle Inventories, 2007.

IBICT – Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia. Avaliação do Ciclo de Vida: ontologia terminológica. Brasília: IBICT, 2014.

HUIJBREGTS, Mark A. J. et al. ReCiPe2016: a harmonized life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level. *International Journal of Life Cycle Assessment*, v. 22, p. 138–147, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1246-y>.

JONKERS, N.; KROP, H.; VAN EWIIK, H.; LEONARDS, P. E. G. Life cycle assessment of flame retardants in an electronics application. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, v. 21, n. 2, p. 146–161, 2015. DOI: [10.1007/s11367-015-0999-z](https://doi.org/10.1007/s11367-015-0999-z).

MILÀ I CANALS, Llorenç et al. Key elements in a framework for land use impact assessment within LCA. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, v. 12, n. 1, p. 5–15, 2007. DOI: <http://dx.doi.org/10.1065/lca2006.05.250>

ROSENBAUM, Ralph K. et al. Usetox—the UNEP-SETAC toxicity model: recommended characterisation factors for human toxicity and freshwater ecotoxicity in life cycle impact assessment. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, v. 13, n. 7, p. 532–546, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11367-008-0038-4>.

ROTTENBACHER, J. S. et al. Usetox 2.0 documentation (version 1). Lausanne: Usetox International Team, 2021. Disponível em: <https://www.Usetox.org/>. Acesso em: 7 maio 2025.

TEEHAN, Paul; KANDLIKAR, Milind. Comparing embodied greenhouse gas emissions of modern computing and electronics products. *Environmental Science & Technology*, v. 47, n. 9, p. 3997–4003, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1021/es303012r>.

TRINH, Lam Thi Kieu; GIAO, Nguyen Thanh. Understanding laptop’s environmental problems using life cycle assessment. *Journal of Energy Technology and Environment*, v. 3, n. 4, 2021. DOI: <https://doi.org/10.37933/nipes.e/3.4.2021.3>.

WILLIAMS, Eric D. Energy intensity of computer manufacturing: hybrid assessment combining process and economic input–output methods. *Environmental Science & Technology*, v. 38, n. 22, p. 6166–6174, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1021/es035152j>.

ZHANG, Xin et al. Assessing the life cycle cumulative energy demand and greenhouse gas emissions of lithium-ion batteries. *Journal of Energy Storage*, v. 43, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103193>.

APÊNDICE I – MEMORIAL DE CÁLCULO

APÊNDICE II – MONTAGEM DA AICV NO SOFTWARE SIMAPRO

Assembly fase Matéria-prima

Matéria-prima	Unidade	Valor	Dataset ecoinvent
Plástico ABS	g	6,366	Acrylonitrile-butadiene-styrene copolymer {RoW} production Cut-off, U
Óxido de alumínio	g	10,830	Aluminium oxide, non-metallurgical {CN} aluminium oxide production Cut-off, U
Alumínio	g	66,430	Aluminium, primary, ingot {CN} production Cut-off, U
Latão	g	0,860	Brass {RoW} production Cut-off, U
Cabo genérico	g	0,600	Cable, unspecified {GLO} production Cut-off, U
Cobre	g	35,700	Copper, cathode {GLO} electrorefining of copper, anode Cut-off, U
Caixa de papelão ondulado	g	128,580	Corrugated board box {RoW} production Cut-off, U
Conector PCI buss	g	0,950	Electric connector, peripheral component interconnect buss {GLO} production Cut-off, U
Componente elétrico, passivo	g	1,350	Electronic component, passive, unspecified {GLO} production Cut-off, U
Resina epóxi	g	0,300	Epoxy resin, liquid {RoW} production Cut-off, U
Plástico EVA	g	6,620	Ethylene vinyl acetate copolymer {RoW} production Cut-off, U
Ouro	g	0,100	Gold {RoW} gold refinery operation Cut-off, U
Processo de injeção de peças plásticas	g	125,872	Injection moulding {RoW} processing Cut-off, U
Circuito integrado, tipo lógico	g	5,180	Integrated circuit, logic type {GLO} production Cut-off, U
Circuito integrado, tipo memória	g	2,180	Integrated circuit, memory type {GLO} production Cut-off, U
Teclado	g	487,380	Keyboard {GLO} production Cut-off, U
Usinagem de componentes de alumínio	g	66,430	Metal working, average for aluminium product manufacturing {RoW} processing Cut-off, U
Usinagem de componentes de aço inox	g	441,336	Metal working, average for chromium steel product manufacturing {RoW} processing Cut-off, U
Usinagem de componentes de cobre	g	35,700	Metal working, average for copper product manufacturing {RoW} processing Cut-off, U
Níquel	g	4,030	Nickel, class 1 {RoW} treatment of metal part of electronics scrap, in copper, anode, by electrolytic refining Cut-off, U
Mouse ótico	g	95,210	Pointing device, optical mouse, with cable {GLO} production Cut-off, U

Poliamida Nylon	g	18,515	Polyamide (Nylon) 6.6, glass filled/EU-27
Plástico policarbonato (PC)	g	20,661	Polycarbonate {RoW} production Cut-off, U
Plástico polietileno alta densidade (PE-HD)	g	23,800	Polyethylene, high density, granulate {RoW} production Cut-off, U
Plástico polietileno baixa densidade (PE-LD)	g	10,280	Polyethylene, low density, granulate {RoW} production Cut-off, U
Plástico polipropileno (PP)	g	1,040	Polypropylene, granulate {RoW} production Cut-off, U
Plástico poliestireno expandido (PS)	g	24,410	Polystyrene, expandable {RoW} production Cut-off, U
Plástico poliestireno comum (PS)	g	4,250	Polystyrene, general purpose {RoW} production Cut-off, U
Plástico Policloreto de Vinila (PVC)	g	3,808	Polyvinylchloride {CN} production mix
Adaptador de energia AC/DC	g	485,550	Power adapter, for laptop {GLO} production Cut-off, U
Papel impresso	g	10,510	Printed paper, offset {RoW} offset printing, per kg printed paper Cut-off, U
Placa-mãe	g	15,870	Printed wiring board, mounted mainboard, laptop computer, Pb free {GLO} production in Brazil Cut-off, U
Placas de circuito impresso	g	281,950	Printed wiring board, surface mounted, unspecified, Pb free {GLO} production Cut-off, U
Silicone	g	8,551	Silicone product {RoW} production Cut-off, U
Prata	g	0,303	Silver {RoW} gold-silver mine operation with refinery Cut-off, U
Pasta de solda	g	0,695	Solder, paste, Sn95.5Ag3.9Cu0.6, for electronics industry {GLO} production Cut-off, U
Aço inoxidável	g	120,950	Steel, chromium steel 18/8, hot rolled {RoW} production Cut-off, U
Aço	g	431,714	Steel, low-alloyed, hot rolled {RoW} production Cut-off, U
Borracha sintética	g	9,622	Synthetic rubber {RoW} production Cut-off, U
Teflon	g	0,936	Tetrafluoroethylene {RoW} production Cut-off, U

Assembly fase Transporte

Componente	Unidade	Valor	Dataset ecoinvent
Transporte terrestre	tkm	5,820	Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO5 {BR} transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO5 Cut-off, U

Transporte marítimo	tkm	16,366	Transport, freight, sea, container ship {GLO} transport, freight, sea, container ship Cut-off, U
Transporte aéreo	tkm	4,055	Transport, freight, aircraft, long haul {GLO} transport, freight, aircraft, dedicated freight, long haul Cut-off, U

Assembly fase Manufatura

Componente	Unidade	Valor	Dataset ecoinvent
Eletricidade	kWh	1,2687	Electricity, low voltage {BR} market group for electricity, low voltage Cut-off, U
Água	kg	6,46	Tap water {BR} tap water production, conventional treatment Cut-off, U
Compostagem	Kg	0,00306	Biowaste {RoW} treatment of biowaste, industrial composting Cut-off, U
Incineração de perigosos	kg	0,000417	Hazardous waste, for incineration {RoW} treatment of hazardous waste, hazardous waste incineration, with energy recovery Cut-off, U
Lodo sanitário	m ³	0,00138	Sewage sludge {RoW} treatment of by anaerobic digestion Cut-off, U

Assembly fase Uso

Componente	Unidade	Valor	Dataset ecoinvent
Eletricidade	kWh	300,7	Electricity, low voltage {BR} market group for electricity, low voltage Cut-off, U

Assembly fase Fim de vida (EoL)

Componente	Unidade	Valor	Dataset ecoinvent
Reciclagem – papel/papelão	g	118,23	Core board (waste treatment) {GLO} recycling of core board Cut-off, U
Reciclagem - plástico	g	15,25	Mixed plastics (waste treatment) {GLO} recycling of mixed plastics Cut-off, U
Lixão (open dump)	g	1184,57	Municipal solid waste {GLO} treatment of municipal solid waste, open dump, very wet infiltration class (1000mm) Cut-off, U
Aterro controlado	g	419,81	Municipal solid waste {GLO} treatment of municipal solid waste, unsanitary landfill, very wet infiltration class (1000mm) Cut-off, U
Aterro sanitário	g	588,22	Municipal solid waste {RoW} treatment of, sanitary landfill Cut-off, U