



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CAMPUS BLUMENAU
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA TÊXTIL

Priscila Faiad Carvalho

**Estratégias de substituição de fibras têxteis para redução das emissões de
CO₂e**

Blumenau
2026

Priscila Faiad Carvalho

**Estratégias de substituição de fibras têxteis para redução das emissões de
CO₂e**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Têxtil da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial para a obtenção do título de Mestra em Engenharia Têxtil.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Cristiane da Costa
Coorientadores: Prof^a. Dr^a. Fernanda Steffens e
Prof. Dr. Antônio Augusto Ulson de Souza

Blumenau

2026

Carvalho, Priscila Faiad

Estratégias de substituição de fibras têxteis para redução das emissões de CO₂e / Priscila Faiad Carvalho ; orientadora, Cristiane da Costa, coorientador, Fernanda Steffens, coorientador, Antônio Augusto Ulson de Souza, 2026.

114 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Blumenau, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Têxtil, Blumenau, 2026.

Inclui referências.

1. Engenharia Têxtil. 2. Fibras têxteis. 3. Emissão de carbono. 4. Sustentabilidade. I. Costa, Cristiane da. II. Steffens, Fernanda . III. Souza, Antônio Augusto Ulson de IV. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Têxtil. V. Título.

Priscila Faiad Carvalho

Estratégias de substituição de fibras têxteis para redução das emissões de CO₂e

O presente trabalho em nível de Mestrado foi avaliado e aprovado, em 8 de dezembro de 2025, pela banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof.(a) Cintia Marangoni, Dr.(a)
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof.(a) Silgia Aparecida da Costa, Dr.(a)
Universidade de São Paulo

Certificamos que esta é a versão original e final do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de Mestra em PGETEX.



Documento assinado digitalmente
Miguel Angelo Granato
Data: 09/03/2026 11:29:09-0300
CPF: ***.641.507-**
Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Coordenação do Programa de Pós-Graduação



Documento assinado digitalmente
CRISTIANE DA COSTA
Data: 09/03/2026 13:56:06-0300
CPF: ***.369.219-**
Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Prof.(a) Cristiane da Costa, Dr.(a)
Orientador(a)

Blumenau, 2026

RESUMO

A indústria têxtil é um setor impactante em termos ambientais, responsável por cerca de 7 % das emissões globais das emissões de dióxido de carbono (CO₂). Este estudo tem como objetivo quantificar e comparar as emissões associadas a diferentes fibras têxteis, propondo substituições estratégicas capazes de reduzir o impacto climático de produtos têxteis acabados. A pesquisa utilizou a ferramenta The 2030 Calculator sob a abordagem *cradle-to-gate*, avaliando onze camisetas com composições distintas, abrangendo algodão convencional, reciclado e orgânico, linho, cânhamo, seda, lã convencional e reciclada, poliéster convencional e reciclado, e por fim, poliamida. A metodologia, fundamentada nas diretrizes de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), busca oferecer dados acessíveis para mensuração de emissões e tomada de decisão sustentável no desenvolvimento de produtos têxteis. Os resultados apontaram reduções expressivas nas emissões quando analisadas as substituições isoladas de fibras têxteis, com destaque para as trocas do algodão convencional por algodão reciclado e orgânico, por linho e cânhamo, além da substituição do poliéster virgem pelo poliéster reciclado. Contudo, tais reduções mostraram-se insuficientes quando avaliadas no produto acabado, frente às metas de mitigação estabelecidas pelo Acordo de Paris, que preveem diminuições de 43 % até 2030 e de, no mínimo, 99 % até 2050. A única substituição que apresentou alinhamento parcial com as metas globais foi a da lã convencional pela lã reciclada, resultando em uma redução de 92,52 % nas emissões do produto acabado, sendo um valor compatível com a meta de 2030, porém ainda inferior à exigência projetada para 2050. Conclui-se, portanto, que embora a substituição de fibras, de forma isolada, não seja suficiente para alcançar integralmente as metas de descarbonização globais, ela representa um avanço significativo rumo à transição sustentável do setor têxtil, especialmente quando associada a estratégias complementares de eficiência energética, uso de fontes renováveis e implementação de modelos de circularidade produtiva.

Palavras-chave: Dióxido de carbono; *ecodesign*; fibras têxteis; sustentabilidade; ODS 12; ODS 13.

ABSTRACT

The textile industry is a highly impactful sector in environmental terms, accounting for approximately 7 % of global carbon dioxide (CO₂) emissions. This study aims to quantify and compare the emissions associated with different textile fibers, proposing strategic substitutions capable of reducing the climate impact of finished textile products. The research employed *The 2030 Calculator* under a *cradle-to-gate* approach, evaluating eleven t-shirts with distinct compositions, including conventional, recycled, and organic cotton, linen, hemp, silk, conventional and recycled wool, conventional and recycled polyester, and polyamide. The methodology, grounded in Life Cycle Assessment (LCA) guidelines, seeks to provide accessible data to support emission measurement and sustainable decision-making in textile product development. The results indicated significant emission reductions when fiber substitutions were assessed individually, with notable decreases in the replacement of conventional cotton by recycled and organic cotton, linen, and hemp, as well as the substitution of virgin polyester by recycled polyester. However, these reductions proved insufficient when assessed in the finished product, in comparison with the mitigation targets established by the Paris Agreement, which call for reductions of 43% by 2030 and at least 99% by 2050. The only substitution that showed partial alignment with global targets was the replacement of conventional wool with recycled wool, resulting in a 92.52% reduction in the emissions of the finished product — compatible with the 2030 target but still below the requirement projected for 2050. Therefore, although fiber substitution alone is not sufficient to fully achieve global decarbonization goals, it represents an important step toward the sustainable transition of the textile sector, especially when combined with complementary strategies such as energy efficiency, the use of renewable sources, and the implementation of circular production models.

Keywords: Carbon dioxide; ecodesign; carbon emissions; textile fibers; sustainability; SDG 12; SDG 13.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Aumento médio anual da temperatura global.....	18
Figura 2 – Aumento médio do nível do mar em milímetros por ano	19
Figura 3 – Crescimento e expectativa da produção mundial de fibras têxteis.....	23
Figura 4 – Produção mundial de fibras em 2023.....	24
Figura 5 – Objetivos do Desenvolvimento Sustentável	26
Figura 6 – Estrutura do modelo linear de produção e consumo	27
Figura 7 – Estrutura do modelo circular de produção e consumo	28
Figura 8 – Etapas de implementação da metodologia de ecodesign	31
Figura 9 – Abrangência e limite dos três principais modelos usados em ACV	33
Figura 10 – Especificações do fluxo produtivo para fibras naturais.....	65
Figura 11 – Especificações do fluxo produtivo para fibras sintéticas	66
Figura 12 – Emissão total para 100 g de camiseta (kg CO ₂ e) utilizando a ferramenta The 2030 Calculator.....	68
Figura 13 – Percentual de diferentes fibras têxteis na produção de camisetas utilizando a ferramenta The 2030 Calculator.....	69
Figura 14 – Variação percentual das emissões na etapa de aquisição do material através de substituição de fibras têxteis.....	78
Figura 15 – Ranqueamento de variação em emissões na produção de camisetas através da substituição de fibras têxteis.....	85
Figura 16 – Estrutura geral da ferramenta	101
Figura 17 – Estrutura da Seção 1.....	103
Figura 18 – Estrutura da Seção 2.....	104
Figura 19 – Estrutura da Seção 3.....	107
Figura 20 – Estrutura da Seção 4.....	108
Figura 21 – Estrutura da Seção 5.....	109

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Dados de emissão de CO ₂ e obtidos na literatura científica com especificação de tipo e composição do produto avaliado	46
Quadro 2 – Análises comparativas de emissão de materiais	50
Quadro 3 – Padrões e análises comparativas do estudo	56
Quadro 4 – Base de dados utilizada para cada fibra têxtil	57
Quadro 5 – Produtos selecionados para avaliação	60
Quadro 7 – Configuração da Seção 2 da ferramenta The 2030 Calculator.....	62
Quadro 8 – Configuração da Seção 2, referente aos processos industriais para fabricação do tecido na ferramenta The 2030 Calculator.....	64
Quadro 8 – Seções e abrangências da ferramenta.....	102
Quadro 9 – Subseções da Seção 1.....	103
Quadro 10 – Subseções da Seção 2.....	105
Quadro 11 – Subseções da Seção 3.....	107
Quadro 12 – Subseções da Seção 4.....	108

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Emissões totais e parciais de CO ₂ e obtidas para camisetas de 100 g em cada fase de fabricação utilizando a ferramenta The 2030 Calculator.....	67
Tabela 2 – Comparação entre a emissão de fibras têxteis (kg CO ₂ e/100 g) obtidas na ferramenta The 2030 Calculator e a variação verificada na literatura	74
Tabela 3 – Análise comparativa para diferentes tipos de algodão	75
Tabela 4 – Análise comparativa para diferentes fibras naturais vegetais.....	75
Tabela 5 – Análise comparativa para diferentes tipos de lã	76
Tabela 6 – Análise comparativa para diferentes tipos de fibras sintéticas	76
Tabela 7 – Análise comparativa entre poliéster e lã convencionais	77
Tabela 8 – Análise comparativa entre a seda e poliamida 6	77
Tabela 9 – Variação percentual das emissões na etapa de aquisição do material através de substituição de fibras têxteis.....	78

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABIT	Associação Brasileira da Indústria Têxtil e de Confecção
ABVTEX	Associação Brasileira do Varejo Têxtil
ACV	Avaliação do Ciclo de Vida
AIB	Association of Issuing Bodies
CA	Cânhamo
CANOPY	Organização ambiental para conservação de florestas
CH ₄	Metano
CO	Algodão
CO ₂	Dióxido de carbono
CO _{2e}	Dióxido de carbono equivalente
COP	Conference of the Parties
CL	Linho
DEFRA	Department for Environment, Food and Rural Affairs (Reino Unido)
EPD	Environmental Product Declaration
GaBi	Software de ACV desenvolvido pela Sphera
GEE	Gases de Efeito Estufa
GHG	Greenhouse Gases
GWP	Potencial de Aquecimento Global
GWP100	Potencial de Aquecimento Global em 100 anos (indicador IPCC)
IEMI	Instituto de Estudos e Marketing Industrial
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
ISO	International Organization for Standardization
LCC	Custeio do Ciclo de Vida
MDP	Painéis de partículas
MPME	Micro, Pequena e Média Empresa
NTM	Network for Transport Measures
N ₂ O	Dióxido Nitroso
NZ	AgResearch
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
ONU	Organização das Nações Unidas
PEF	Product Environmental Footprint (Pegada Ambiental do Produto)
PET	Polietileno Tereftalato

PA	Poliamida
PLA	Polylactic Acid (Ácido Polilático)
PNUMA	Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente
PP	Polipropileno
rPET	Poliéster Reciclado
SE	Seda
SEBRAE	Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas
UE	União Europeia
UF	Unidade Funcional
UNFCCC	United Nations Framework Convention on Climate Change
WO	Lã
WGMS	Serviço Mundial de Observação de Glaciares
WMO	World Meteorological Organization
ZDHC	Programa global para redução de químicos perigosos

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	14
1.1	OBJETIVOS	17
1.1.1	Objetivo Geral.....	17
1.1.2	Objetivos específicos	17
2	REVISÃO DA LITERATURA.....	18
2.1	INDUSTRIALIZAÇÃO E MUDANÇAS CLIMÁTICAS	18
2.1.1	Emissões globais da indústria têxtil	23
2.1.2	Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS).....	25
2.2	INDÚSTRIA TÊXTIL, MODELOS DE PRODUÇÃO E <i>DESIGN</i> DE PRODUTOS.....	27
2.2.1	<i>Ecodesign</i>.....	29
2.2.2	Avaliação do Ciclo de Vida (ACV).....	31
2.2.2.1	<i>Ferramentas de emissão de carbono.....</i>	33
2.3	APLICAÇÃO DA METODOLOGIA ACV PARA PRODUTOS TÊXTEIS	38
2.4	CONSIDERAÇÕES SOBRE O ESTADO DA ARTE	51
3	METODOLOGIA	54
3.1	CONFIGURAÇÃO DA CALCULADORA.....	61
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	67
4.1	EMIÇÃO DE CARBONO NA PRODUÇÃO DE CAMISETAS E ANÁLISE COMPARATIVA DE IMPACTO GWP100.....	67
4.2	ANÁLISE DE VARIAÇÃO DE EMISSÕES ATRAVÉS DA SUBSTITUIÇÃO DE FIBRAS TÊXTEIS	74
4.3	PROPOSTAS DE SUBSTITUIÇÃO DE FIBRAS NO DESENVOLVIMENTO DE PRODUTO TÊXTIL E CONTRIBUIÇÕES PARA AS METAS GLOBAIS.....	79
4.3.1	Substituição de lã convencional por lã reciclada	79
4.3.2	Substituição de algodão convencional por algodão reciclado e orgânico	80
4.3.3	Substituição do algodão convencional por linho e cânhamo.....	81
4.3.4	Substituição de poliéster convencional por poliéster reciclado	82
4.3.5	Substituição de poliéster por poliamida	82
4.3.6	Substituição de poliamida por seda.....	83
4.3.7	Substituição de poliéster por lã.....	83

4.3.8	Impacto das substituições de fibras nas emissões totais das camisetas	
	84	
5	CONCLUSÃO	89
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	90
7	ANEXO 1 – THE 2030 CALCULATOR	100

1 INTRODUÇÃO

A produção têxtil possui grande relevância histórica, cultural e econômica. Passou por intensos avanços tecnológicos desde a década de 1970, o que ampliou a sua produtividade, mas também os impactos ambientais e sociais. Desde a revolução industrial, o crescimento populacional e o aumento do consumo de bens intensificaram o uso de recursos naturais e a emissão de Gases de Efeito Estufa (GEE), principalmente devido a queima de combustíveis fósseis e às atividades industriais. Estima-se que entre 1970 e 2030, as emissões globais possam alcançar 90 % de aumento, agravando as mudanças climáticas (Imran *et al.*, 2023; Pachauri *et al.*, 2013).

A indústria têxtil está profundamente associada às emissões de GEE, abrangendo desde o cultivo e extração das matérias-primas até as etapas de fiação, tecelagem, beneficiamento, confecção, varejo e descarte. Todas as fases do ciclo de vida dos produtos têxteis precisam ser consideradas para que se alcance uma redução efetiva nas emissões (Zhang *et al.*, 2020).

Dada a estreita relação entre a indústria têxtil e os desafios ambientais urgentes enfrentados atualmente, os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) estabelecem diretrizes globais que incentivam as indústrias a adotarem práticas de menor impacto, que contemplam a implementação de modelos circulares, gestão eficiente de insumos e resíduos, mapeamento e controle dos impactos ambientais resultantes do desenvolvimento de produtos e manufatura de bens. Nesse contexto, a redução das emissões de GEE emerge como um dos fortes indicadores de progresso em direção a essas transformações (ONU, 2025).

O setor têxtil global está empenhado em reduzir os impactos relacionados à emissão de gases de efeito estufa, impulsionado por exigências regulatórias e pela crescente conscientização ambiental entre consumidores e empresas. As principais metodologias para mensurar as emissões de carbono baseiam-se na Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), por meio do uso de normas ISO, em especial 14040, 14044 e 14064, que são reconhecidas como as formas mais precisas e cientificamente fundamentadas para mensurar emissões e orientar estratégias de redução (Klos *et al.*, 2021).

No entanto, dada a complexidade e o custo de implementação dessas metodologias de forma personalizada dentro das corporações, novas ferramentas

vêm surgindo para democratizar o cálculo das emissões de carbono no setor, como SimaPro®, Umberto® e The 2030 Calculator. A Agenda 2030 das Nações Unidas, por meio dos ODS e do Acordo de Paris, firmado em 2015, estão fortemente interligados em seu propósito de conter o aquecimento global e promover um desenvolvimento industrial de baixo carbono. O Acordo de Paris estabelece a meta de limitar o aumento da temperatura média global a no máximo 2 °C, preferencialmente 1,5 °C, em relação aos níveis pré-industriais, exigindo uma redução global de aproximadamente 45 % nas emissões de CO₂e até 2030 e a neutralidade de carbono até 2050 (Imran *et al.*, 2023). O indicador CO₂e representa uma unidade de medida que expressa o impacto total dos diferentes gases de efeito estufa em termos equivalentes ao dióxido de carbono (CO₂), permitindo comparar e somar suas contribuições para o aquecimento global.

A Associação Brasileira da Indústria Têxtil e de Confecção (ABIT) lançou recentemente a Liga de Descarbonização, um marco relevante na jornada do setor têxtil brasileiro, alinhado com o desenvolvimento sustentável e com as iniciativas da União Europeia na liderança de maior regulamentação do setor na agenda. A Liga da Descarbonização incentiva o envolvimento de empresas varejistas para elaboração e publicação de inventários de GEE até 2027, não apenas para cumprir demandas ambientais, mas também para fortalecer a posição competitiva das empresas brasileiras no mercado, inclusive no cenário internacional (IEMI, 2025). Além disso, o Brasil está comprometido com metas de redução de 37 % das emissões até o final de 2025 e 43 % até 2030, com base nos níveis firmados em 2005 (Ministério do Meio Ambiente, 2025)

A crescente preocupação com os impactos ambientais da indústria têxtil tem impulsionado o desenvolvimento de estratégias mais sustentáveis, entre as quais o *ecodesign* se destaca como uma abordagem promissora, que consiste em integrar critérios ambientais em todas as etapas do desenvolvimento de produtos, visando reduzir impactos ao longo do ciclo de vida, desde a escolha de matérias-primas até o descarte ou reciclagem, com o objetivo de reduzir impactos negativos. Estudos apontam que a seleção consciente de fibras e a adoção de processos produtivos mais eficientes são fundamentais para mitigar os efeitos ambientais da cadeia têxtil. Nesse contexto, a integração de princípios de sustentabilidade no *design* e na produção têxtil surge como um caminho necessário para a transformação do setor rumo a modelos

mais responsáveis e de menor impacto ambiental (Gonzalez *et al.*, 2023a; Jasinevičius *et al.*, 2018; Navarrete *et al.*, 2020).

Diante desse cenário, emergem questões centrais que orientam esta pesquisa, especialmente no que se refere aos impactos das metas globais de descarbonização e à formalização das legislações ambientais, com foco nas emissões de carbono. Tais diretrizes vêm influenciando diretamente a forma como as empresas desenvolvem seus produtos, monitoram os impactos de cada decisão e se adaptam às novas exigências regulatórias e mercadológicas. Considerando esse contexto de transformações e a crescente demanda por relatórios de impactos ambientais, o presente estudo tem como objetivo fornecer dados quantitativos sobre as emissões de carbono associadas a diferentes fibras têxteis. Propõe-se substituições estratégicas de materiais que possibilitem a redução dessas emissões no desenvolvimento de produtos, considerando o desempenho e as propriedades de cada material avaliado, que são essenciais para o sucesso comercial de todo produto têxtil.

Em função das novas diretrizes de desenvolvimento de produtos e produção sustentável, torna-se fundamental disponibilizar informações acessíveis e aplicáveis para metodologias de *ecodesign*. Assim, esta dissertação busca apoiar a seleção de insumos têxteis de menor impacto, com foco em suas respectivas emissões de carbono, identificando oportunidades de substituição de materiais e contribuindo para a redução dos impactos ao longo da cadeia produtiva, mantendo o viés estratégico e comercial em tais propostas. Com isso, almeja-se promover o alinhamento das práticas empresariais às diretrizes globais de descarbonização e aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável.

A partir dessa fundamentação, define-se a seguinte pergunta de pesquisa: como a seleção e substituição de diferentes fibras têxteis pode impactar nas emissões de carbono de um produto acabado, de modo que esse impacto se torne relevante para as reduções de emissões, através das indicações dos ODS, e metas do Acordo de Paris?

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Quantificar e comparar as emissões de CO₂e associadas a diferentes fibras têxteis por meio da ferramenta The 2030 Calculator, utilizando o modelo *cradle-to-gate*, com o intuito de propor substituições estratégicas que orientem escolhas de menor impacto no desenvolvimento de produtos têxteis. A pesquisa busca fornecer dados quantitativos que possam ser aplicados em metodologias de *ecodesign*, alinhando-se às diretrizes globais de descarbonização e aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável.

1.1.2 Objetivos específicos

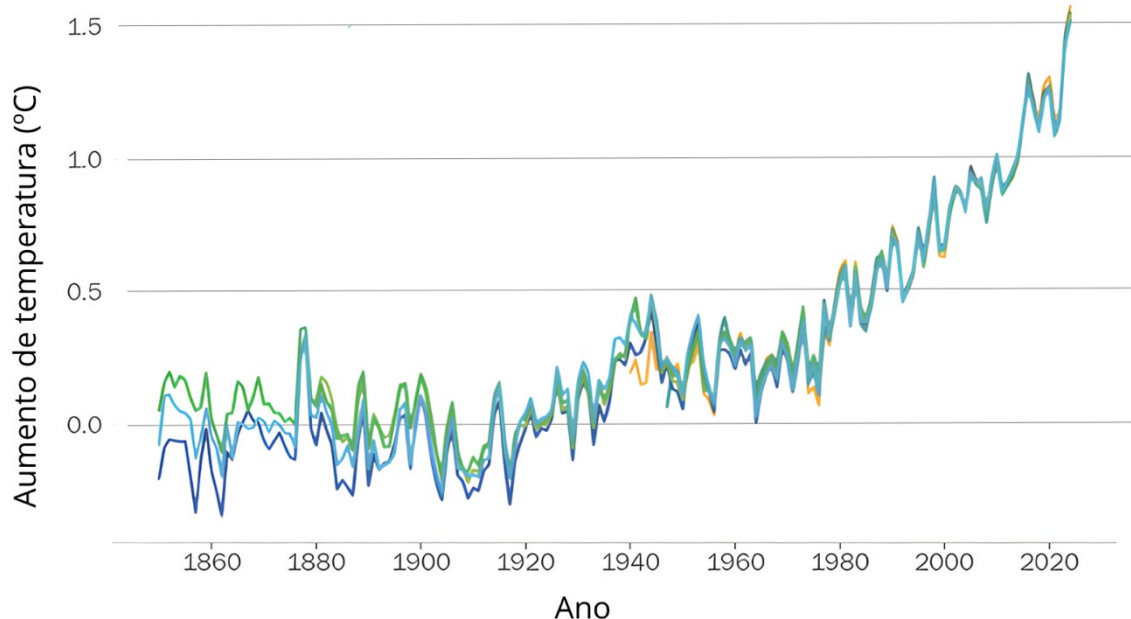
- a) Analisar o indicador de impacto climático de diferentes matérias-primas têxteis;
- b) Verificar se a substituição de materiais pode influenciar de forma significativa na redução das emissões de carbono de produtos têxteis;
- c) Estimar o impacto das substituições de fibras têxteis para metas globais de descarbonização.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 INDUSTRIALIZAÇÃO E MUDANÇAS CLIMÁTICAS

O Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) define o termo ‘mudança climática’ como uma alteração no estado do clima que persiste por um longo período, geralmente décadas ou mais. De janeiro a setembro de 2024, a temperatura climática do planeta marcou um aumento médio de 1,54 °C quando comparado com a temperatura pré-industrial. Na Figura 1 apresenta-se o aumento da temperatura global desde os anos 1860, segundo World Meteorological Organization (2024).

Figura 1 – Aumento médio anual da temperatura global

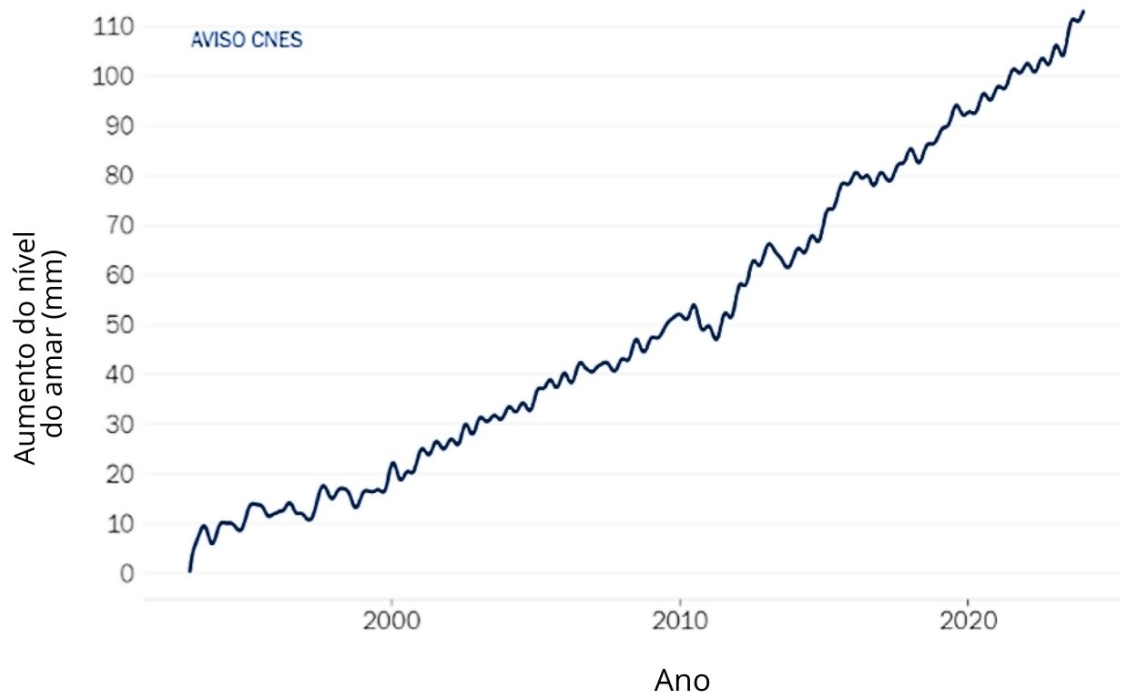


Fonte: Adaptado de World Meteorological Organization (2024)

As evidências científicas são contundentes ao indicar que o planeta atravessa um processo acelerado de mudanças climáticas, impulsionado principalmente pelas atividades humanas. Os últimos anos, segundo registros históricos, configuram-se como os mais quentes já observados desde o início das medições globais. Tais transformações são impulsionadas, sobretudo, pelo aumento na concentração de gases de efeito estufa (NASA, 2023; World Meteorological Organization, 2024).

O aumento da temperatura climática é uma causa direta do derretimento das calotas polares e da elevação do nível do mar. Monitoramentos realizados pelo Serviço Mundial de Observação de Glaciares (WGMS) indicaram uma perda mássica anual das geleiras equivalente a 1,2 metro de água dos oceanos, configurando a maior perda registrada desde 1950. Em 2022 e 2023, a massa de gelo perdida corresponde a um volume de água comparável ao do rio Amazonas. Na Suécia, por exemplo, as geleiras perderam aproximadamente 10 % do seu volume total entre 2021 e 2023. Esse derretimento, somado à dilatação térmica dos oceanos, fenômeno físico em que o volume da água se expande com o aumento da temperatura, contribui significativamente para elevação do nível do mar. Estima-se que cerca de 90 % da energia acumulada no planeta esteja armazenada nos oceanos, o que intensifica seu aquecimento e desencadeia efeitos diretos sobre todo o ecossistema global (NASA, 2023; World Meteorological Organization, 2024). Na Figura 2 apresenta-se o aumento médio do nível do mar desde 1993.

Figura 2 – Aumento médio do nível do mar em milímetros por ano



Fonte: Adaptado de World Meteorological Organization (2024)

Dados captados por satélites mostram que desde 1978, a extensão média anual do gelo Ártico diminuiu 2,7 % por década. Foram observadas alterações nas

quantidades de algas, plânctons e peixes, relacionados com a mudança na temperatura da água, salinidade e níveis de oxigênio, desequilibrando o ecossistema (Pachauri *et al.*, 2013).

O aquecimento global observado é causado pelas ações humanas, principalmente pela emissão de gases de efeito estufa, com ênfase no dióxido de carbono, metano (CH_4) e óxido nitroso (N_2O). Desde 1750, o aumento nas concentrações de CO_2 e CH_4 observados foram de 47 % e 156 %, respectivamente (Calvin *et al.*, 2023). O CO_2 segue como o maior contribuinte para o aquecimento global, representando cerca de 75 % das emissões de gases de efeito estufa. O CH_4 , embora em menor quantidade, possui um potencial de aquecimento global cerca de 28 vezes superior ao do CO_2 (Saunio *et al.*, 2020).

Um importante indicador relacionado ao aquecimento global é o Potencial de Mudanças Climáticas em um horizonte de 100 anos (GWP100), que converte emissões de diferentes gases de efeito estufa em um dado equivalente ao CO_2 . Os cálculos realizados para este indicador parametrizam a energia térmica que 1 quilograma de um gás retém na atmosfera ao longo de 100 anos em relação a 1 quilograma de CO_2 , de forma que todos os GEE possam ser representados através de um único parâmetro, sendo ele o CO_2e , que por sua vez, é o indicador de mudanças climáticas mais usado por ACV e inventários (Calvin *et al.*, 2023).

Estudos recentes demonstram que essas mudanças têm implicações severas para o equilíbrio climático do planeta. Estima-se que, sem políticas agressivas de mitigação, a exposição humana sob condições de calor extremo poderá triplicar até o final do século, especialmente nas regiões tropicais. Além disso, a elevação contínua das temperaturas médias contribui para o agravamento de eventos extremos, como enchentes, incêndios florestais e secas intensas, fenômenos já observados com maior frequência nas últimas duas décadas (Diffenbaugh; Burke, 2019).

Em 2024, o Brasil vivenciou uma grande catástrofe natural causada pelas mudanças climáticas, as enchentes na cidade de Porto Alegre, no estado do Rio Grande do Sul, que causou mais de 180 mortes e afetou cerca de 2,3 milhões de pessoas, além de deixar 630 mil desabrigados, gerando prejuízos econômicos de bilhões de dólares (World Meteorological Organization, 2024).

A combustão de combustíveis fósseis, como carvão, petróleo e gás natural, é a maior responsável pelas emissões de gases de efeito estufa, especialmente dióxido

de carbono. Estima-se que cerca de 73 % das emissões globais de GEE provêm da geração de energia baseada nesses combustíveis (Bilgen, 2014; Zhang *et al.*, 2024).

As cadeias produtivas industriais contribuem para as emissões globais, dentre elas, a indústria têxtil e moda (Gálvez-Sánchez *et al.*, 2024). Os principais impactos ambientais estão relacionados ao uso intensivo de recursos naturais no cultivo de fibras, uso de materiais sintéticos derivados do petróleo e ao elevado consumo energético nos processos de produção, tingimento e transporte. A localização geográfica da fabricação de têxteis também apresenta forte relação com as emissões, pois está relacionada com a fonte de energia usada pelo país (Li *et al.*, 2024).

A China lidera como país com maior emissão de CO₂ do planeta, em grande parte devido à sua elevada dependência do carvão mineral para geração de energia, que compõe mais de 56 % de sua matriz energética (Liu *et al.*, 2020). Apesar dos esforços para incorporar fontes renováveis, o carvão ainda é dominante na geração de eletricidade e na sua produção industrial (Musa *et al.*, 2018). Além disso, o rápido crescimento econômico chinês, especialmente nas últimas décadas, impulsionou um consumo energético massivo e diretamente ligado à queima de combustíveis fósseis (Zhang *et al.*, 2024). O Brasil, por outro lado, apresenta um perfil energético mais limpo em termos de geração elétrica, pois cerca de 60 % são provenientes de fontes renováveis, em especial a hidreletricidade. O setor têxtil brasileiro consome 74 % de energia renovável, mas ainda há espaço para melhorias, especialmente na redução do uso de gás natural, que representa 21 % do consumo energético (IEMI, 2025).

Na 26ª Conferência das Partes (COP26), mais de 50 empresas e organizações do setor de têxtil e moda apoiaram os requerimentos da organização sem fins lucrativos Textile Exchange, que solicitou a implementação de políticas comerciais que incentivem o uso de materiais têxteis de menor impacto, como fibras recicladas. A proposta destaca a necessidade de tarifas beneficiárias como uma ferramenta prática para reduzir os custos associados a esses materiais, promovendo maior competitividade para empresas comprometidas com práticas de menor impacto. Essa abordagem inovadora de utilizar políticas comerciais, busca remover barreiras financeiras, alinhando o setor aos objetivos do Acordo de Paris, além de acelerar a transição da indústria em direção a uma redução de 45 % nas emissões de gases de efeito estufa na produção de fibras até 2030, contribuindo significativamente para mitigar os efeitos das mudanças climáticas (Textile Exchange, 2021a). A França posicionou seus esforços para alcançar a meta de redução de emissão de GEE em

75 % até 2050 (Kim *et al.*, 2020), enquanto o Brasil reafirmou suas metas em 2025 e segue se propondo a alcançar uma redução de 53 % até 2030 com base nos níveis de 2005 (Climate Action Tracker, 2025).

A indústria têxtil enfrenta desafios significativos relacionados ao consumo de recursos e impacto ambiental, o que levou a União Europeia (UE) a publicar a Estratégia da UE para os Têxteis Sustentáveis e Circulares, em 2022. Essa iniciativa integra os compromissos do Pacto Ecológico Europeu, do novo Plano de Ação para a Economia Circular e da Estratégia Industrial, com o objetivo de transformar o setor até 2030. A estratégia estabelece que os produtos têxteis inseridos no mercado europeu deverão ser duradouros, reparáveis, recicláveis, conter fibras recicladas sempre que possível, além de estarem livres de substâncias perigosas, promovendo práticas sociais e ambientalmente responsáveis. As medidas abrangem todo o ciclo de vida dos produtos, incluindo estratégias de *ecodesign*, ações específicas contra o *greenwashing*, que consistem em práticas de empresas que divulgam informações ambientais enganosas ou exageradas para transmitir uma falsa imagem de sustentabilidade, mitigação da liberação de microplásticos e criação de um caminho de transição para ecossistemas têxteis circulares e de menor impacto (Fonseca *et al.*, 2023).

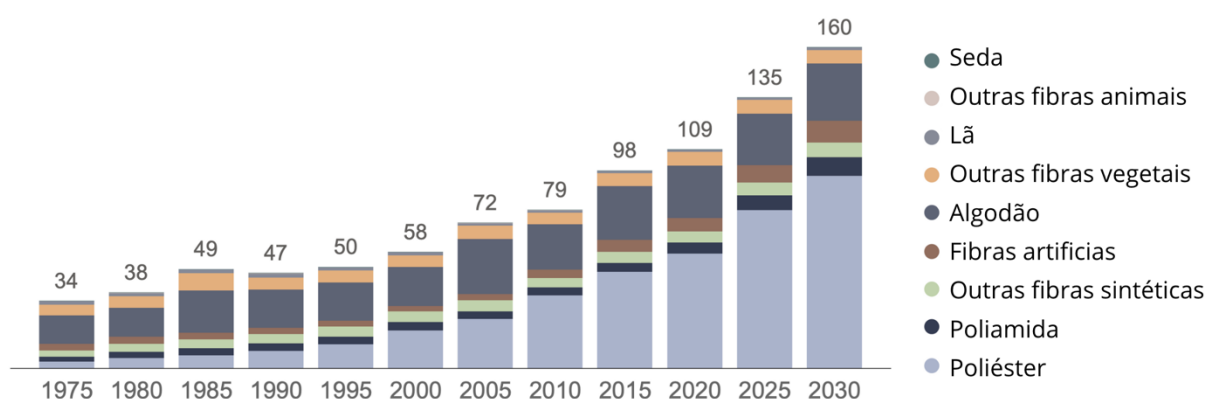
Pelas iniciativas apresentadas, verifica-se que a indústria têxtil está passando por transformações significativas em toda sua cadeia produtiva, começando pela escolha de materiais e fibras, como demonstra o Desafio do Poliéster Reciclado 2025, lançado pelo Textile Exchange em parceria com a Fashion Industry Charter for Climate Action, em colaboração com a ONU. Essa iniciativa visa aumentar a adoção global de poliéster reciclado (rPET), substituindo progressivamente o poliéster virgem. Até 2020, apenas 14 % do poliéster utilizado era reciclado, mas o objetivo é elevar essa taxa para 45 % até o final do ano de 2025, alcançando um volume global de 17,1 milhões de toneladas métricas. Com a adesão de 85 marcas e fornecedores, o desafio não apenas contribui com a redução de emissões de gases de efeito estufa, mas também acelera uma mudança estrutural no mercado, estabelecendo as bases para que o poliéster reciclado alcance 90 % do volume total até 2030 (Textile Exchange, 2021b).

2.1.1 Emissões globais da indústria têxtil

A produção mundial de têxteis e vestuário foi tracionada pelo modelo *Fast Fashion*, e posteriormente, potencializada pelo modelo *Ultra Fast Fashion*. Os modelos ultrarrápidos de produção consistem em elevado volume e velocidade de desenvolvimento e manufatura de novos itens, geralmente associados à baixa qualidade. Além da produção em larga escala, o consumo elevado está diretamente relacionado ao aumento do descarte de itens. Esse cenário se torna ainda mais preocupante devido às emissões de gases de efeito estufa, que são, em grande parte, resultantes da queima de combustíveis fósseis para a geração de energia, consumida pela indústria para fabricação de itens (Fonseca *et al.*, 2023).

A mudança climática global é um dos maiores desafios enfrentados pela sociedade contemporânea. A indústria têxtil está intimamente relacionada com as emissões de carbono, que iniciam no *design* de produto e estende-se ao fluxo produtivo e pós-consumo (Muthu, 2015). A produção global de fibras têxteis teve seu novo recorde em 2023, com 124 milhões de toneladas produzidas. O poliéster possui a maior contribuição neste crescimento, substituindo o algodão como a fibra mais usada no mundo. As fibras sintéticas representaram 67 % da produção mundial de fibras têxteis em 2023, sendo que o poliéster representa 57 % da produção total. Na Figura 3 apresenta-se o crescimento produtivo de fibras têxteis no cenário mundial (Textile Exchange, 2024).

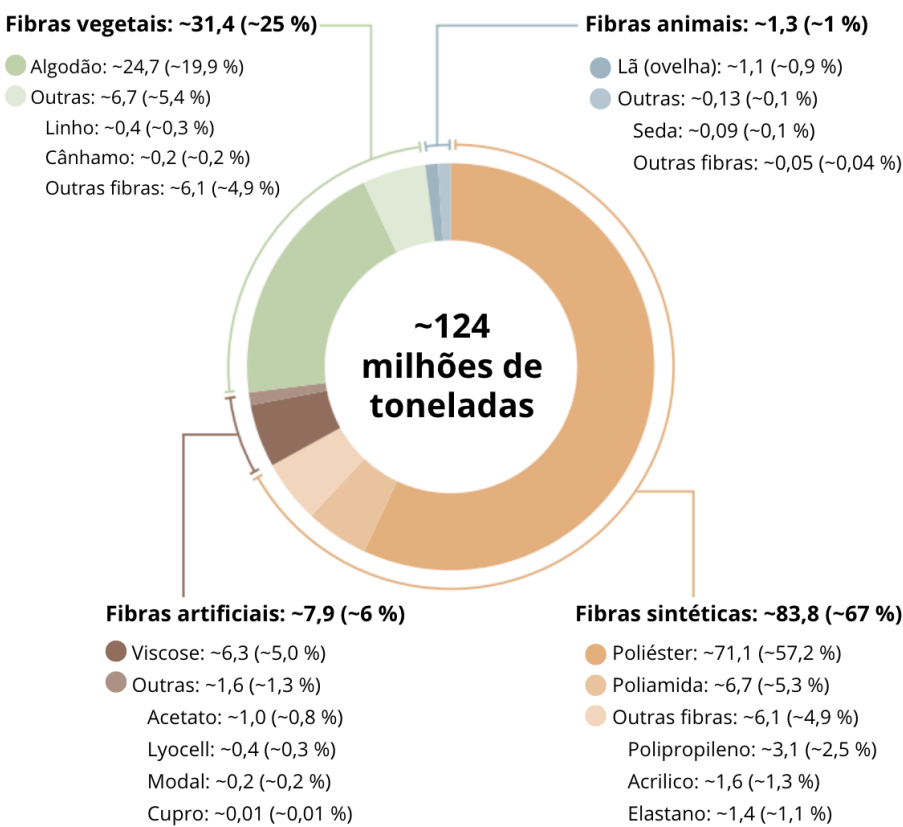
Figura 3 – Crescimento e expectativa da produção mundial de fibras têxteis (em milhões de toneladas)



Fonte: Adaptado de Textile Exchange (2024)

Na Figura 4 apresenta-se a produção mundial de fibras em 2023 e as contribuições de cada fibra, respectivamente.

Figura 4 – Produção mundial de fibras em 2023
(em milhões de toneladas e percentual global por fibra)



Fonte: Adaptado de (Textile Exchange, 2024)

Nesse contexto, as taxas de emissões associadas a novos produtos têxteis representam um indicador relevante para ferramentas de gestão de impacto ambiental. Essas métricas permitem identificar, no desenvolvimento de produtos e ao longo de toda a cadeia produtiva, oportunidades para melhorias e estratégias de mitigação de emissões, contribuindo diretamente para o combate às mudanças climáticas (Muthu, 2015).

As decisões tomadas nas fases iniciais do desenvolvimento de produto têxtil exercem influência determinante sobre seus impactos ambientais ao longo de todo o ciclo de vida. A aplicação de princípios de *ecodesign* tem se mostrado uma estratégia eficaz para mitigar esses impactos, permitindo que aspectos como a escolha de

materiais, processos de fabricação e estratégias de fim de vida sejam considerados de forma integrada. Estudos apontam que a substituição de fibras convencionais por materiais de menor impacto pode apresentar reduções consideráveis das emissões durante o ciclo de vida do produto. Além disso, a extensão da vida útil dos produtos, promovida por meio de *designs* duráveis e reutilizáveis, pode diminuir substancialmente a demanda por novos recursos e reduzir emissões associadas à produção. A ACV é amplamente reconhecida como ferramenta metodológica essencial para embasar essas escolhas, ao identificar os principais pontos críticos de impacto em cada etapa da cadeia (Muthu, 2015; Roos *et al.*, 2015; Shen; Kumar Patel, 2010). Dessa forma, o *design* de produto deixa de ser apenas uma etapa estética ou funcional e assume papel estratégico na construção de soluções sustentáveis para a indústria têxtil.

2.1.2 Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS)

Os ODS são um apelo global para combater os problemas mais urgentes da atualidade, dentre eles, proteger o meio ambiente e o clima, com metas traçadas para serem alcançadas até 2030 e 2050. Os ODS são compostos por 17 objetivos interconectados que abordam os principais desafios de desenvolvimento no Brasil e no mundo, que consistem nos três pilares da sustentabilidade: sociedade, ambiente e economia (ONU, 2025). Na Figura 5 apresenta-se os 17 ODS.

Figura 5 – Objetivos do Desenvolvimento Sustentável



Fonte: ONU (2025)

Embora a indústria têxtil se relacione com diversos ODS, como os que tratam de condições de trabalho adequadas, inovação, consumo de energia, vida marinha e terrestre, o presente estudo concentra-se especialmente na conexão do setor têxtil com os ODS 12 e 13. Esses dois objetivos abordam, respectivamente, a produção e o consumo sustentável e as ações contra as mudanças do clima, temas diretamente vinculados aos impactos ambientais do setor e centrais para a quantificação das emissões de carbono ao longo do ciclo de vida dos produtos têxteis.

O ODS 12 propõe uma reestruturação profunda no setor, abrangendo desde o desenvolvimento de produto até a produção, promovendo o *ecodesign*, que envolve o uso de materiais e técnicas de menor impacto, além de estratégias para desmontagem e reciclagem, ampliando a durabilidade das peças e reduzindo impactos ambientais. No âmbito de cadeia de suprimentos, destaca-se a seleção de fornecedores com base em critérios ambientais e sociais, a adoção de códigos de conduta e o estímulo ao uso de matérias-primas recicladas ou provenientes de fontes responsáveis. Já na produção, enfatiza-se a implementação de processos limpos, o controle do consumo de água e energia, a reutilização de resíduos têxteis e o uso de metodologias ACV para mensurar e reduzir impactos socioambientais ao longo de toda a cadeia. Essas ações, em conjunto, revelam a importância de um reposicionamento estratégico das empresas do setor para atender às exigências

globais de sustentabilidade e responder aos desafios ambientais que envolvem a moda contemporânea (Cai; Choi, 2020).

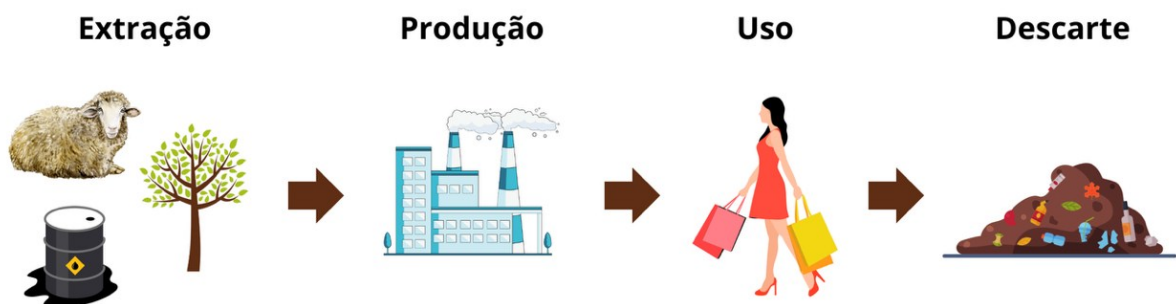
O ODS 13 propõe ações urgentes para combater as mudanças climáticas e seus impactos, incentivando setores produtivos, como o têxtil, a integrar estratégias de mitigação e adaptação em toda a cadeia, como por exemplo, reduzir as emissões de gases de efeito estufa desde a produção das fibras até o descarte dos produtos e adotar fontes renováveis de energia e estabelecer metas de neutralidade de carbono. Dessa forma, as aplicações de metodologias, como a ACV, são essenciais para mapear e quantificar impactos, orientar a substituição de materiais de alta emissão de carbono e promover maior transparência sobre o desempenho climático das empresas. Assim, o ODS 13 torna-se um eixo estratégico para a indústria têxtil, articulando-se diretamente com os objetivos deste estudo.

O estudo do *design* se mostra central nesse processo, uma vez que é a partir dele que se determinam as escolhas de insumos, fluxos de materiais, durabilidade do produto, reparabilidade e as possibilidades de reuso e reciclagem. O *ecodesign* é uma das estratégias presentes no modelo circular, e permite o desenvolvimento de produto não apenas com base na sua funcionalidade e estética, mas também no seu impacto em todo o ciclo de vida (Gabriel; Luque, 2020).

2.2 INDÚSTRIA TÊXTIL, MODELOS DE PRODUÇÃO E *DESIGN* DE PRODUTOS

O modelo linear de produção, predominante na economia global, baseia-se na extração de materiais e insumos, seguida pela fabricação, consumo, e por fim, descarte dos produtos, conforme representado na Figura 6.

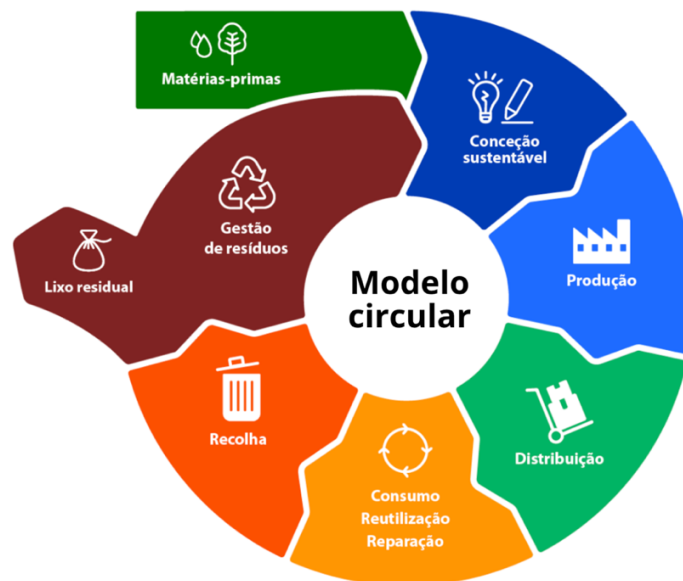
Figura 6 – Estrutura do modelo linear de produção e consumo



Fonte: A autora (2025)

Em contrapartida, o modelo circular tem como objetivo reutilizar e reciclar o máximo de resíduos e produtos, pré e pós-consumo, a fim de fechar o ciclo produtivo de forma sustentável e eficiente com o mínimo de descarte, conforme representado na Figura 7.

Figura 7 – Estrutura do modelo circular de produção e consumo



Fonte: Schroeder; Anggraeni; Weber (2019)

As primeiras estratégias adotadas por iniciativas governamentais para promover a sustentabilidade concentraram-se na reciclagem, no reuso e na gestão de resíduos gerados pelo modelo linear, ou seja, ao reinserir resíduos na cadeia produtiva, inicia-se uma transição do modelo tradicional para o modelo circular. Além disso, com base nas demandas urgentes da atualidade relacionadas a industrialização, os esforços institucionais, industriais, comunidade acadêmica e políticas públicas têm se direcionado cada vez mais para a economia circular. Esse modelo busca ampliar a durabilidade dos produtos e fomentar negócios sustentáveis e eficientes, visando a mitigação dos impactos sociais e ambientais. Com sua crescente adoção, a economia circular tem o potencial de transformar radicalmente os processos de criação, fabricação e consumo. Os modelos circulares propõem abordagens voltadas para a eliminação da geração e do descarte de resíduos, promovendo a eficiência no uso de recursos e gerando benefícios econômicos (Dahmani *et al.*, 2021).

A economia circular pode ser definida por meio de ações e práticas específicas, como reutilização, reprocessamento, reparação, reciclagem e uso de metodologias de *ecodesign*. Em um contexto mais amplo, essas práticas configuram-se como ferramentas relevantes para a transformação dos modelos sustentáveis de consumo e produção. Além disso, apresentam benefícios promissores, como a economia e eficiência de recursos, geração de empregos, fomento à inovação e aumento da produtividade. Apesar dos potenciais benefícios, apenas 6 % dos materiais produzidos globalmente são reciclados ou são reintegrados em sistemas circulares (Schroeder; Anggraeni; Weber, 2019).

2.2.1 Ecodesign

Entre as estratégias para modelos circulares, destaca-se o *ecodesign*, que consiste na concepção de produtos projetados desde a sua idealização para serem reutilizados e/ou reciclados, prolongando ao máximo o ciclo de vida dos artigos e seus componentes (Dahmani *et al.*, 2021).

O conceito de *Life Cycle Thinking*, que traduzido para o português significa Pensamento de Ciclo de Vida, propõe uma visão ampla e integrada sobre o ciclo de vida dos produtos, desde a seleção dos materiais até o descarte final do produto acabado. Essa abordagem busca considerar todas as etapas pelas quais um produto passa, incluindo concepção, desenvolvimento, fabricação, uso e fim da vida útil, com o objetivo de reduzir impactos ambientais ao longo do processo. As etapas do *ecodesign* são os processos do *Life Cycle Thinking* aplicados durante o desenvolvimento de produto, um conjunto de práticas que incorporam critérios ambientais nas decisões de projeto. Dessa forma, o pensamento em ciclo de vida se torna essencial para desenvolver soluções mais sustentáveis, que levem em conta não apenas a funcionalidade e a estética do produto, mas também seu impacto ambiental em todas as fases (ISO, 2020).

O *ecodesign*, também chamado de *design* ecológico ou sustentável, é uma abordagem estratégica que integra considerações ambientais em todas as etapas do desenvolvimento de um produto. Seu objetivo principal é minimizar os impactos ambientais negativos ao longo do ciclo de vida, desde a seleção de matérias-primas até o descarte final. Ao adotar essa prática, empresas podem reduzir o consumo de recursos naturais, diminuir a geração de resíduos e promover soluções mais eficientes

e sustentáveis, contribuindo para a economia circular e para a minimização dos desafios ambientais globais (Fonseca *et al.*, 2023). São metodologias potencialmente capazes de diminuir os efeitos ambientais associados a manufatura de produtos têxteis, além de contribuírem com as reduções nas emissões de gases de efeito estufa (Schäfer; Löwer, 2021).

O conceito de *ecodesign* ganhou destaque nos últimos anos, contemplando atividades acadêmicas e aplicações comerciais em escala global. A ênfase inicial no aspecto ambiental do *design* evoluiu para incluir aspectos econômicos e sociais, com projetos que abrangem desde produtos de pequena escala a sistemas industriais de grande escala de produção (Kim *et al.*, 2020).

O foco exclusivo na melhoria de um único aspecto do processo produtivo de um produto pode resultar na transferência do impacto ambiental para outras etapas da cadeia, comprometendo a eficácia das soluções adotadas. Diante disso, para atender às exigências das práticas de manufatura sustentável, surgiu o conceito de *ecodesign*, com o objetivo de reduzir os impactos ambientais ao mesmo tempo em que se assegura a qualidade do produto e os benefícios econômicos ao longo de todo o seu ciclo de vida. Como uma estratégia-chave para viabilizar esta diretriz, o *ecodesign* configura-se como uma abordagem integrada que considera simultaneamente os requisitos de projeto e os processos ecológicos, visando minimizar os impactos ambientais durante todas as fases do ciclo de vida de um produto (Zhang *et al.*, 2018)

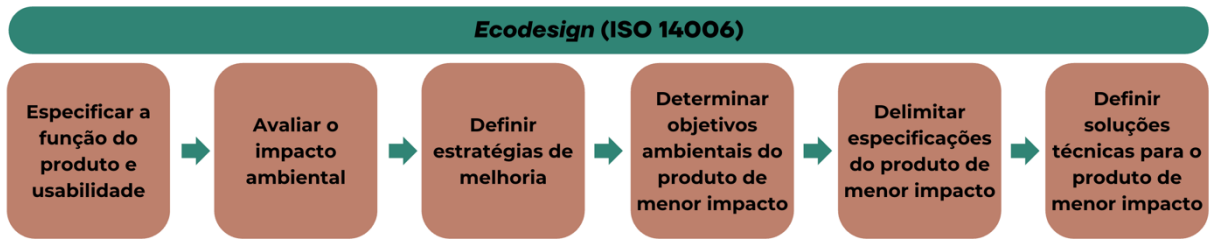
Na década de 1990, o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA) promoveu o *ecodesign* como instrumento para aprimorar a gestão ambiental, que pode ser aplicado em diferentes fases do ciclo de vida de um item, podendo assumir orientações sistêmicas ou centradas no produto. A literatura evidencia que o *ecodesign* possui um alto potencial para reduzir impactos ambientais e promover melhorias significativas na sustentabilidade dos produtos e processos (Kim *et al.*, 2020).

O *ecodesign* pode ser aplicado em diferentes níveis, abrangendo desde a melhoria e requalificação de produtos já existentes até a concepção de novos itens que integram soluções inovadoras. Essa abordagem pode ser orientada tanto para o fluxo produtivo quanto para o produto, promovendo práticas de menor impacto ao longo de toda a cadeia. A aplicação sistêmica envolve mudanças em processos, fluxos de produção e eficiência energética, enquanto as mudanças relacionadas ao produto

focam na escolha de materiais e maior durabilidade, levando em consideração o pós-consumo do item, integrando possibilidades de reparo dos produtos, reciclagem e reuso (Fonseca *et al.*, 2023).

O processo de implementação do *ecodesign* tipicamente consiste em seis passos, segundo a ISO 14006, ilustrado na Figura 8.

Figura 8 – Etapas de implementação da metodologia de *ecodesign*



Fonte: Adaptado de Fonseca *et al.*, (2023)

O passo número dois, avaliação de impacto ambiental referente ao produto, é particularmente significativo, pois como o nome sugere, identifica as etapas ou processos no ciclo de vida de um produto com maior impacto ambiental (Fonseca *et al.*, 2023).

2.2.2 Avaliação do Ciclo de Vida (ACV)

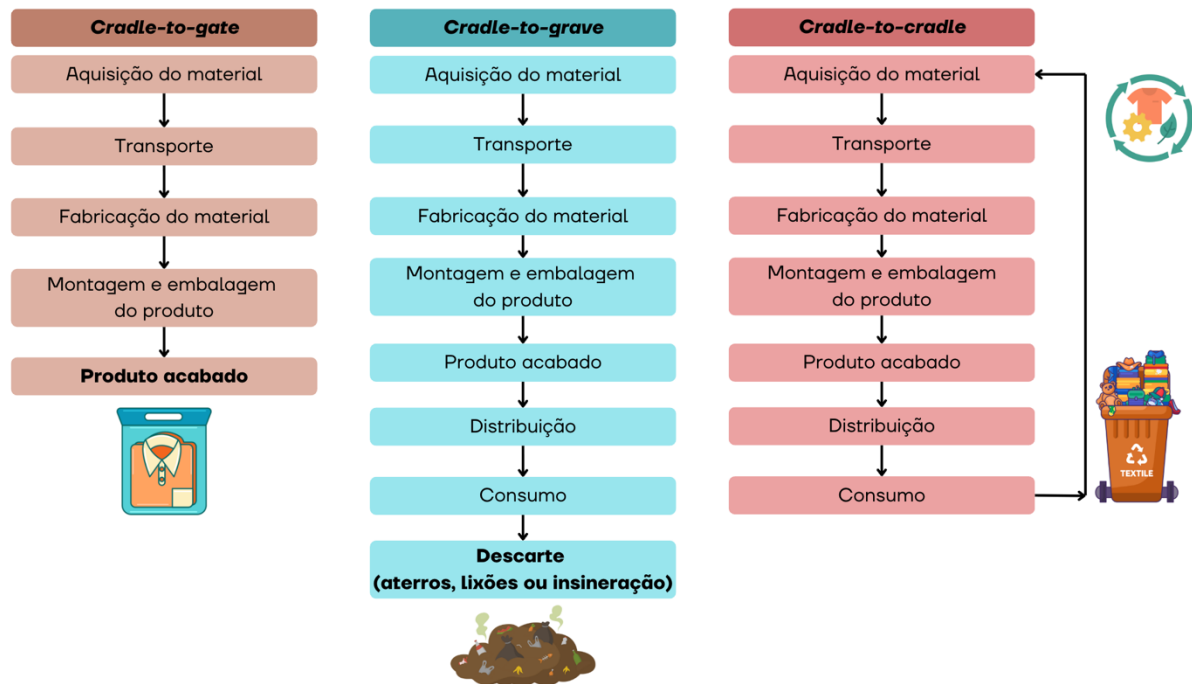
Para enfrentar os desafios relacionados aos impactos da indústria têxtil, é fundamental adotar abordagens que considerem todo o ciclo de vida dos produtos. Nesse contexto, a ACV e o *ecodesign* despontam como ferramentas estratégicas. A ACV permite uma análise abrangente dos impactos ambientais associados a cada fase do ciclo de vida dos têxteis, desde a extração de matérias-primas, passando pela fabricação, distribuição e uso, até o descarte no final da sua vida útil. Por meio dessa avaliação científica e quantitativa, é possível identificar pontos críticos e propor melhorias ambientais ao longo de toda a cadeia produtiva. O *ecodesign* complementa essa abordagem ao integrar princípios sustentáveis no desenvolvimento de produtos, promovendo alternativas que minimizem os impactos ambientais e contribuam para uma transição rumo a uma indústria têxtil mais sustentável e circular (Fonseca *et al.*, 2023).

A ACV pode ser conduzida sob diferentes abordagens, sendo a primeira possibilidade classificada como modelo *cradle-to-gate*, que considera as etapas desde a extração e origem da matéria-prima até a embalagem final do produto pelo fabricante. Nesse caso, são desconsideradas as fases de distribuição, uso e descarte do produto. Esse modelo é amplamente utilizado quando se deseja avaliar especificamente os impactos ambientais da produção, sem considerar a vida útil do produto. Já a abordagem *cradle-to-cradle* amplia esse escopo ao incluir o reaproveitamento do item após o consumo, entendendo-o como insumo para novos ciclos produtivos. Essa perspectiva está alinhada à lógica da economia circular, em que os materiais são concebidos para retornar continuamente ao sistema, por meio de rotas técnicas, como reutilização e reciclagem, ou biológicas, como compostagem e biodegradação (MUTHU, 2015).

O terceiro modelo, denominado *cradle-to-grave*, contempla o mesmo fluxo produtivo do formato anterior, porém somado com as etapas subsequentes até o descarte do produto, no pós-consumo. Este formato é representado por um modelo linear completo, que contempla todas as fases do ciclo de vida de um produto, desde a extração da matéria-prima até o descarte final, que por sua vez é destinado a aterros ou incineração. A escolha da abordagem de ACV é decisiva na definição de estratégias de *ecodesign* na indústria têxtil, pois permite identificar com maior precisão os pontos críticos de impacto ambiental ao longo do ciclo de vida do produto.

Em metodologias de ACV, a definição dos limites do sistema é essencial para delimitar o escopo da análise, sendo que diferentes abrangências podem ser adotadas conforme o objetivo do estudo. Na Figura 9 representa-se a abrangência de cada um dos modelos.

Figura 9 – Abrangência e limite dos três principais modelos usados em ACV



Fonte: A autora (2025)

2.2.2.1 Ferramentas de emissão de carbono

A metodologia ACV é fundamental para quantificar os impactos ambientais dos produtos e é amplamente utilizada por grandes organizações globais para medir suas emissões de carbono. Sua aplicação tem se tornado cada vez mais requisitada, impulsionada pelas novas regulamentações que exigem relatórios e declarações mais precisas sobre emissões e sustentabilidade corporativa. A alta eficiência da ACV decorre de sua abordagem abrangente e detalhada, que considera todas as etapas do ciclo de vida de um produto, desde a extração das matérias-primas até o descarte, permitindo identificar com precisão as fases de maior impacto e orientar decisões de redução de impacto ambiental. Contudo, trata-se de uma ferramenta metodologicamente complexa, que demanda recursos significativos das empresas, como equipes qualificadas, tempo para coleta e processamento de informações, conhecimento técnico para modelagem de sistemas e investimento financeiro para planejamento e execução da metodologia. A partir desse contexto, *softwares* baseados em bancos de dados consolidados, podem apoiar as organizações na obtenção de informações sobre os impactos ambientais de seus processos e produtos, sem a necessidade de uma estrutura interna tão robusta, tornando o acesso

a essas análises mais viáveis e contribuindo para que as empresas avancem em sustentabilidade e competitividade (Silva *et al.*, 2017).

Atualmente, existem vários *softwares* baseados em ACV disponíveis no mercado, podendo ser plataformas pagas ou gratuitas. A metodologia usada por tais ferramentas podem ser mais abrangentes em alguns modelos do que em outros, devido a fatores como funcionalidades, disponibilidade de bancos e conjuntos de dados, interface do usuário, qualidade e gestão dos dados, assim como os princípios de modelagem utilizados para construir os sistemas de produtos e os processos unitários (Silva *et al.*, 2017). Ferramentas como SimaPro®, GaBi, OpenLCA, Umberto®, Greenly®, Fairly Made, The 2030 Calculator, OEKO-TEX® Impact Calculator e Carbonfact LCA Engine, são exemplos de *softwares* desenvolvidos com base em metodologias ACV para serem usados como calculadoras de emissão de carbono, de forma mais acessível e simplificada, com ampla aplicação de produtos e processos, inclusive para indústria têxtil.

Em um estudo sobre *softwares* usando metodologias ACV, com o objetivo de compreender as diferenças nos resultados obtidos por distintas plataformas de avaliação ambiental, realizou-se uma análise comparativa utilizando quatro ferramentas amplamente reconhecidas e utilizadas atualmente, sendo elas: GaBi, OpenLCA, SimaPro e Umberto NXT. Para as quatro calculadoras selecionadas, realizaram-se as mesmas avaliações, baseados no mesmo produto e considerando variáveis e processos equivalentes em todas as ferramentas. O produto modelado foi a produção industrial de painéis de partículas (MDP) no Brasil, em abordagem *gate-to-gate* (Silva *et al.*, 2017). A metodologia do estudo baseou-se na construção de um inventário padronizado, com dados extraídos das respectivas ferramentas e na aplicação do método de avaliação de impactos recomendado pela Comissão Europeia, desenvolvida para padronizar e aumentar a comparabilidade de estudos ACV, principalmente voltados para comunicação ambiental dos produtos. Uma das categorias de avaliação selecionada para a comparação do estudo é referente a mudanças climáticas, medida através da emissão de dióxido de carbono durante a produção via GWP100. Os dados foram processados seguindo as normas ISO 14040 e ISO 14044, que tratam especificamente dos princípios, estrutura, requisitos e diretrizes para a condução de estudos de ACV, com as etapas de caracterização e normatização aplicadas para permitir a comparação entre categorias e *softwares*. A maioria das diferenças encontradas relacionou-se ao tipo de dados de cada

ferramenta e a forma como cada uma avalia as taxas de incertezas e a sensibilidade dos resultados da ACV. A disponibilidade de bases de dados e os custos de investimento também foram destacados como diferenças relevantes entre as ferramentas analisadas. Os resultados apresentaram variações significativas entre as calculadoras usadas no estudo, alcançando variações de até 66,7 % entre os dados analisados. Como conclusão, os autores destacam que a escolha do *software* para ACV pode influenciar significativamente os resultados e, por consequência, as decisões baseadas nos estudos. Por isso, recomenda-se que os profissionais e empresas dominem profundamente a ferramenta escolhida, suas metodologias e comuniquem de forma transparente suas limitações e incertezas derivadas do *software* selecionado.

Uma revisão sistemática da literatura científica sobre a aplicação de ACV na indústria têxtil com foco na integração de ferramentas utilizadas estratégias de *ecodesign* selecionou 39 artigos científicos que incluíssem análises em modelos *cradle-to-gate*. As calculadoras mais citadas nos artigos analisados no estudo foram SimaPro, GaBi e OpenLCA, frequentemente associados à base de dados Ecoinvent. Entre os indicadores ambientais analisados, destaca-se o potencial de aquecimento global GWP100. A revisão sistemática demonstrou que a maioria dos estudos se concentra nas fibras de algodão e poliéster, evidenciando que o processo de produção da fibra e do fio é, na maioria dos casos, a etapa com maior impacto ao longo do ciclo de vida. Os estudos com escopo *cradle-to-gate* foram os mais recorrentes, indicando uma dificuldade comum no mapeamento das fases de uso e descarte. A revisão também apontou lacunas metodológicas relevantes, como a ausência de dados regionalizados, baixa padronização de critérios de alocação e limitada inclusão de aspectos sociais. Observou-se ainda que a integração entre os resultados da ACV e decisões de desenvolvimento de produto é incipiente, com poucos estudos traduzindo os dados ambientais em estratégias práticas de *ecodesign*. Os autores concluem que, apesar do reconhecimento da ACV como ferramenta estratégica para mensuração de impactos ambientais, sua aplicação prática na indústria têxtil ainda enfrenta desafios significativos. A adoção de ferramentas mais acessíveis, bases de dados abertas e métodos simplificados podem facilitar esse processo. Por fim, o estudo recomenda maior alinhamento com iniciativas regulatórias emergentes, como o Digital Product Passport e a metodologia Product Environmental Footprint (PEF), para viabilizar a padronização e ampliar o uso da ACV como base técnica para o desenvolvimento de

produtos mais sustentáveis na cadeia têxtil global (Nishan Adhikari; Li; Gopalakrishnan, 2025; Shen; Worrell; Patel, 2012).

A publicação de Zhang *et al.*, (2018) apresentaram um estudo aplicado em uma indústria têxtil chinesa com o objetivo de propor modelos de melhoria no fluxo produtivo de tecidos de poliéster e algodão. A metodologia ACV foi utilizada com o objetivo de identificar as etapas de maior impacto ambiental no processo de fabricação dos artigos, abrangendo desde a obtenção da matéria-prima, até a disposição final do produto, e por fim, apresentar propostas de melhoria com base nessa avaliação. A ACV aplicada no estudo identificou que os tecidos de algodão e poliéster analisados geram impactos significativos em análise GWP100. O estudo seguiu as diretrizes das normas ISO 14040 e ISO 14044 supracitadas e separou o fluxo produtivo em quatro fases, sendo eles: cultivo do algodão; fiação; tecelagem; estamparia; e tingimento. Como o foco principal do estudo foi a otimização dos processos produtivos internos, a exclusão da fase de uso e distribuição permitiu concentrar a análise nas áreas sob controle direto da indústria, definida como modelo *cradle-to-gate* na metodologia. Para obtenção dos resultados, utilizou-se o *software* GaBi. A unidade funcional definida foi de duas toneladas de produto têxtil composto por poliéster e algodão. Para fins de simplificação e padronização da análise, foi considerada a hipótese de que todos os produtos avaliados seriam produzidos com o mesmo tipo de fio e com características técnicas equivalentes. Após a análise dos resultados obtidos com a ACV, o estudo propôs seis modelos de melhoria no processo, dentre eles, um modelo de *design* otimizado, que por sua vez apresentou avanço significativa no desempenho ambiental do produto. A implementação dos modelos de melhorias alcançou uma redução de 50,13 % na utilização de recursos, 50,08 % nos impactos ecológicos e 7,65 % nos impactos à saúde humana, além de evolução na qualidade do produto (Zhang *et al.*, 2018).

Em uma análise comparativa de aplicabilidade, funcionalidade e limitações, três ferramentas foram selecionadas, SimaPro, GaBi e Sustainable Minds. No estudo foi investigado como a escolha do *software* pode influenciar os resultados e a interpretação de impactos ambientais de produtos industriais, especialmente no caso de estruturas complexas (Grajewski *et al.*, 2024). Foram utilizados como base os métodos ACV, com abrangência *cradle-to-grave*, baseado nas normas ISO 14040 e ISO 14006. Foram analisados dois itens, produto A e B, com variantes relacionadas à origem e produção. Para cada um dos produtos, foram avaliados os resultados

baseados em produção na União Europeia e Ásia. Para realizar a comparação entre as ferramentas, foram analisados os resultados obtidos para os mesmos produtos de referência nas três plataformas selecionadas. No entanto, como cada ferramenta utiliza uma metodologia de cálculo distinta, foi identificada uma dificuldade na comparação direta dos resultados. Diante disso, e considerando que cada *software* apresenta os dados de forma diferente, optou-se por utilizar as emissões de dióxido de carbono via GWP100 como critério de análise, por se tratar de um indicador comum entre todos os programas avaliados. Os autores do estudo observaram uma variação significativa nas emissões de CO₂e estimadas pelos diferentes softwares de ACV, tanto em relação à origem geográfica quanto ao produto avaliado. Para o produto A, o software SimaPro estimou emissões de 99 kg CO₂e para produção na União Europeia e 198 kg CO₂e para a Ásia. O Sustainable Minds apresentou os maiores valores, com 186 kg CO₂e para União Europeia e 189 kg CO₂e para produção asiática. A calculadora GaBi registrou os menores resultados, com 61 kg CO₂e e 65 kg CO₂e para UE e Ásia, respectivamente. Para o produto B, os resultados apresentaram que o SimaPro indicou 43 kg CO₂e para a União Europeia e 153 kg CO₂e para a Ásia, enquanto o Sustainable Minds apontou 70 kg CO₂e e 190 kg CO₂e, e a calculadora GaBi, novamente com os menores índices, 14 kg CO₂e e 22 kg CO₂e, respectivamente. Observou-se que a ferramenta SimaPro apresentou resultados com diferenças consideráveis entre as variantes de localização, com duas vezes mais emissões de CO₂e na Ásia do que na União Europeia, enquanto as plataformas GaBi e Sustainable Minds apresentaram resultados próximos entre as variantes A e B. O estudo ressaltou que o *software* SimaPro foi a única ferramenta com possibilidade de distinguir a região de origem dos materiais. Para as demais, as origens foram consideradas globais e genéricas. Nos dados obtidos no produto B, observou-se que os resultados das variantes de localização para a mesma plataforma apresentam proporções similares. Porém, ao comparar os dados gerados pelas três plataformas na mesma variante, os resultados apresentam diferenças significativas, causadas pela utilização de distintas bases de dados e metodologias entre as ferramentas. A partir dos resultados, o estudo evidenciou diferenças relevantes nos impactos calculados para as mesmas unidades funcionais, atribuídas a fatores como a qualidade e profundidade das bases de dados, nível de regionalização, detalhamento dos processos e método de caracterização empregado. A ferramenta SimaPro demonstrou ser a mais robusta em termos de banco de dados e capacidade de

modelagem. O *software* GaBi, embora sólido em sua versão profissional, apresentou limitações na versão educacional utilizada no estudo. Já o Sustainable Minds foi considerado intuitivo e de fácil acesso, mas com baixa precisão e pouco detalhamento técnico, o que compromete análises mais complexas. As variações encontradas nos valores de emissão de CO₂e, que alcançou até três vezes mais emissões em um mesmo produto modelado em diferentes ferramentas, revelaram um ponto essencial para análise, que embora todas as ferramentas sigam metodologias ACV, seus parâmetros de modelagem, bases e escopos distintos afetam diretamente os resultados. Dessa forma, é essencial considerar a finalidade para o uso das ferramentas, o nível de complexidade dos modelos a serem desenvolvidos, a base de dados utilizada e o grau de precisão exigido nos resultados, além de profunda compreensão de variáveis nas plataformas utilizadas (Grajewski *et al.*, 2024).

Verifica-se, portanto, que a escolha da ferramenta para a análise pode abranger diferentes requisitos, dependendo das necessidades específicas da empresa, objetivos do estudo, categorias de impacto mais relevantes e clareza metodológica que se deseja alcançar. Com isso, é essencial entender as diferenças nos fatores de caracterização de cada *software* para avaliação dos resultados, uma vez que todas elas apresentaram divergências de resultados, mesmo com a utilização da mesma metodologia e base de dados (Silva *et al.*, 2017).

2.3 APLICAÇÃO DA METODOLOGIA ACV PARA PRODUTOS TÊXTEIS

A partir da literatura acadêmica, foram selecionados artigos científicos com aplicação metodológica ACV para produtos têxteis.

Em um estudo publicado na revista Sustainability por Gonçalves *et al.*, (2024), avaliou-se os impactos de camisetas brancas, confeccionadas em tecidos de malha, padronagem *jersey*, produzidas em Portugal, utilizando ACV com abordagem *cradle-to-gate*, adotada com o objetivo de isolar e analisar exclusivamente as variações introduzidas pelo tipo de fibra e variáveis de produção, como origem e classificação dos materiais avaliados. A ferramenta utilizada para avaliação da categoria GWP100 foi o *software* OpenLCA v1.11.0, integrado à base de dados Ecoinvent v3.7.1, seguindo as diretrizes das normas ISO 14040 e 14044. A massa de material considerada foi de 1 kg de camiseta branca, composto por cinco camisetas de 200 gramas cada. Os processos considerados incluíram desde o transporte dos resíduos

têxteis pós-industriais até a confecção da peça final, abrangendo reciclagem, fiação, malharia, tingimento, acabamento, corte e costura. O estudo avaliou três modelos de camisetas com composições distintas. A Camiseta 1, composta por 50 % de algodão reciclado pós-industrial e 50 % de algodão orgânico, apresentou emissão de 3,12 kg CO₂e. Já a Camiseta 2, confeccionada com 100 % de algodão orgânico, resultou em uma emissão de 4,0 kg CO₂e, enquanto a Camiseta 3, produzida com 100 % de algodão convencional, apresentou o maior impacto, com 7,7 kg CO₂e. Os resultados mostraram que a camiseta que continha algodão reciclado apresentou desempenho superior, relacionado às emissões de carbono, com uma redução de 23 % em comparação à camiseta composta por 100 % algodão orgânico e 58 % de redução frente à camiseta em algodão. Além disso, o trabalho reforça a relevância do uso de ferramentas de avaliação ambiental, pelo seu potencial de democratização do acesso a análises de ciclo de vida de produtos do setor têxtil. A utilização de calculadoras e *softwares* de carbono contribui para ampliar a transparência, qualificar decisões de *design* e produção, e apoiar a conformidade com exigências regulatórias emergentes, promovendo práticas mais sustentáveis e alinhadas aos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (Gonçalves *et al.*, 2024).

Em outro estudo de Aravin Prince Periyasamy; Jiri Militky (2020) foram apresentados resultados de uma análise com metodologia ACV para fibras de poliéster virgem e recicladas por diferentes métodos, em modelo *cradle-to-gate*, com unidade funcional de 1 tonelada de fibras, com resultados expressos via GWP100. Os resultados indicaram que o poliéster reciclado mecanicamente apresentou o menor impacto, com emissão de 0,96 t de CO₂e. Em seguida, o processo de reciclagem semi-mecânica resultou em 1,88 t de CO₂e, enquanto a reciclagem química apresentou 2,59 t de CO₂e quando realizada com monômero BHET e 3,08 t de CO₂e quando realizada com monômero DMT. O poliéster virgem apresentou o maior impacto entre todos os métodos analisados, com emissão de 4,06 t de CO₂e. Os autores apresentaram dados de um segundo estudo (Shen; Worrell; Patel, 2012) que investigou as emissões de GEE do poliéster virgem e reciclado (rPET) em modelo *cradle-to-grave*. A unidade funcional definida foi de 1 quilograma de fibra. As emissões associadas ao poliéster virgem variaram entre 3,3 e 4,6 kg de CO₂e, enquanto o rPET apresentou valores menores, variando entre 1,75 e 2,75 kg de CO₂e (Aravin Prince Periyasamy; Jiri Militky, 2020).

O estudo de Van Der Velden; Patel; Vogtländer (2014) aplicou metodologia ACV para mensurar as emissões de carbono de diferentes tecidos crus, compostos por fibras de algodão, poliéster e poliamida em abordagem *cradle-to-gate*. Foram utilizadas bases de dados ACV, emissões governamentais holandesas registradas, dados obtidos diretamente com indústrias têxteis e a plataforma Ecoinvent, alinhado com a ISO 14044. A unidade funcional definida foi de 1 kg de material cru. Os resultados indicaram que o poliéster apresentou valor mais elevado, com 8,75 kg de CO₂e, seguido pelo algodão, com 3,60 kg CO₂e. A poliamida apresentou o menor impacto relacionado ao indicador entre as fibras analisadas, com 2,70 kg CO₂e (Van Der Velden; Patel; Vogtländer, 2014).

O estudo publicado por Vink *et al.*, (2003) que aplica ACV para a produção de poliácido láctico (PLA) da marca NatureWorks™, considerou o processo produtivo, desde o cultivo do milho até a obtenção dos pellets de PLA, definido como modelo *cradle-to-pellet*, incluindo etapas de moagem úmida, fermentação em ácido láctico, conversão em lactídeo e polimerização. O estudo seguiu as normas ISO 14040, 14041, 14042 e 14043. No que se refere às emissões de gases de efeito estufa, os autores identificaram que o PLA apresentou um impacto de aproximadamente 1,8 kg CO₂e por quilograma de PLA (Vink *et al.*, 2003).

Outro trabalho publicado por Rana *et al.*, (2015a) compila estudos de ACV ao longo do ciclo de vida do algodão, no modelo *cradle-to-gate*. Nesse estudo, para o fio de algodão produzido na Ásia, a emissão foi de 2,46 kg CO₂e por quilograma de produto, enquanto o fio fabricado na Europa apresentou valor menor, de 1,25 kg CO₂e para a mesma unidade funcional. No caso do cultivo, a fibra de algodão certificada CmiA apresentou emissão de 1,04 kg CO₂e por quilograma, ao passo que o algodão convencional registrou 1,80 kg CO₂e (Rana *et al.*, 2015a).

Um artigo publicado por Santos; Abreu (2025) aplicou a metodologia de ACV para comparar o impacto ambiental de cinco tecidos de malha produzidos com 100 % de algodão, em padronagem jersey, que diferiam quanto ao tipo e à origem da fibra. As amostras avaliadas incluíram um tecido 100 % algodão convencional, um 100 % orgânico, uma mistura de 60 % orgânico e 40 % convencional, uma combinação de 50 % orgânico e 50 % reciclado pós-industrial, e uma amostra padrão composta por 60 % orgânico, 20 % reciclado pós-industrial e 20 % reciclado pós-consumo. A unidade funcional adotada foi de 1 kg de tecido de malha, considerando o escopo *cradle-to-gate*, que abrangeu o cultivo do algodão, a reciclagem mecânica quando

aplicável, a fiação e malharia, com exclusão das etapas de beneficiamento, corte, costura, transporte ao cliente e uso do produto acabado. A modelagem foi conduzida no software SimaPro v9.1.1, utilizando a base de dados Ecoinvent 3.8.2021 e o método GWP100, conforme as diretrizes estabelecidas pelas normas ISO 14040 e ISO 14044. Os resultados indicaram que a amostra padrão, composta por 60 % de algodão orgânico, 20 % de reciclado pós-industrial e 20 % de reciclado pós-consumo, apresentou emissões de 0,64 kg CO₂e por quilograma de tecido sem tingimento e 2,72 kg CO₂e com tingimento. O tecido composto por 100 % de algodão convencional apresentou os maiores valores entre as amostras, com emissões de 1,30 kg CO₂e sem tingimento. Já o tecido 100 % orgânico apresentou valores muito próximos, com 0,64 kg CO₂e. A amostra composta por 60 % de algodão orgânico e 40 % de convencional apresentou emissões de 0,85 kg CO₂e. Por fim, o tecido formado por 50 % de algodão orgânico e 50 % de reciclado apresentou as menores emissões do conjunto, com 0,56 kg CO₂e (Santos; Abreu, 2025)

O relatório técnico do Cotton Incorporated (2021) apresenta uma abordagem ACV para o algodão em três níveis de produto, sendo eles fibra, tecido de malha e tecido plano. As unidades funcionais definidas foram de 1 tonelada de material para os três tipos de artigo. Para tecido plano e malha, foram consideradas as etapas de fiação, preparação, tingimento e acabamento, incluindo transportes. A abordagem utilizada foi *cradle-to-gate*. Entre os processos contemplados na análise da fibra de algodão estão o preparo do solo, o cultivo, o uso de insumos e irrigação, a colheita, a limpeza e o transporte. No caso dos tecidos planos e de malha, foram incluídas adicionalmente as etapas de fiação, preparação, tingimento e acabamento, bem como os respectivos transportes intermediários. A modelagem foi conduzida no *software* GaBi, seguindo as diretrizes das normas ISO 14040 e ISO 14044. Os resultados apontaram que a fibra de algodão apresentou emissão de 268 kg CO₂e por tonelada de produto. Já o tecido plano 100 % algodão apresentou emissão significativamente superior, de 8760 kg CO₂e por tonelada, enquanto o tecido de malha 100 % algodão registrou o maior valor entre os três, com 9070 kg CO₂e por tonelada (Cotton Incorporated, 2021).

Um estudo desenvolvido por Nautiyal *et al.*, (2025) aplicou a metodologia ACV para comparar as emissões de GEE associadas à produção de fibras de lã e de poliéster. A unidade funcional adotada foi de 393 gramas de material, considerando o

escopo *cradle-to-gate*, compreendendo desde a extração/cultivo das matérias-primas até a obtenção da fibra acabada. A modelagem foi conduzida no *software* SimaPro, em conformidade com a norma técnica ISO 14040, utilizando as bases de dados Ecoinvent, nas versões 3.7 e 3.10. O estudo incorporou dados complementares provenientes da base de pesquisa regional neozelandesa AgResearch (NZ), referenciada no próprio artigo. Os resultados indicaram que a fibra de lã apresentou emissões de carbono variando entre 3,60 e 5,07 kg CO₂e por unidade funcional, de acordo com a base de dados utilizada. As variações refletem diferenças metodológicas e regionais entre os inventários de dados Ecoinvent e AgResearch, especialmente relacionadas às práticas agrícolas e de manejo pecuário. Para o poliéster, os valores encontrados foram de 1,47 kg CO₂e na versão 3.10 do Ecoinvent e de 1,85 kg CO₂e na versão 3.7, demonstrando emissões consideravelmente menores em comparação à lã. As diferenças observadas entre os resultados das versões da base de dados Ecoinvent são justificadas por atualizações realizadas ao longo do tempo (Nautiyal *et al.*, 2025).

Um estudo sobre as emissões de carbono de tecidos de linho, dos autores Gomez-Campos *et al.*, (2021), aplica ACV em um tecido de linho para reforço em compósitos, adotando o escopo *cradle-to-gate* e unidade funcional de 360 g/m². A cadeia modelada abrangeu cultivo, maceração, desfibramento, fiação (e nesse o processo de penteagem) e tecelagem, com produção na França e etapas finais na China, que por sua vez refletem diferenças de fontes energéticas e transportes associados. A ferramenta utilizada foi o SimaPro v8.5.2, com bases de dados Ecoinvent v3.4 e Agribalyse v1.3. Metodologicamente, os autores conduzem uma ACV em conformidade com ISO 14040 e 14044 para GWP100. Com base na unidade funcional definida, o estudo apresentou 7,79 kg CO₂e/m². As principais contribuições para o impacto climático situam-se na tecelagem e fiação, seguidos do cultivo e maceração.

O estudo de Marcinkowski; Poniecka; Barburski (2025) avaliou as emissões de um compósito de linho com reforço em tecido plano com matriz epóxi por infusão. A unidade funcional definida é de 1 m² de material com escopo *cradle-to-grave*, abrangendo extração de recursos, transporte, processamento, eletricidade e disposição final por incineração. Metodologicamente, os autores conduziram a ACV conforme a ISO 14040 e 14044 com base de dados Ecoinvent v3.8. Quanto aos GEE, definidos por GWP100, o estudo reporta emissões equivalentes a 3,93 kg CO₂e.

O relatório técnico LCA of European Flax® (European Confederation of Flax and Hemp, 2022) publicou um inventário do ciclo de vida do linho conforme a metodologia PEF da Comissão Europeia para a fibra longa de linho European Flax®, produzida na França, Bélgica e Holanda. O estudo define a unidade funcional como 1 kg de fibra longa de linho e cobre o escopo *cradle-to-gate*, contemplando as etapas de cultivo, maceração, transporte, limpeza e separação mecânica, visando fornecer dados rastreáveis para o setor têxtil e para futuras aplicações em vestuário e calçados. Nos resultados de emissões GWP100, o estudo reporta 0,64 kg CO₂e por quilograma de fibra longa de linho (European Confederation of Flax and Hemp, 2022).

A publicação de Göran Sandin (2019) reuniu 45 publicações de ACV aplicadas em estratégias circulares, incluindo produtos reciclados e seus efeitos relacionados às emissões de GEE através do indicador GWP100. O autor analisou comparativamente artigos têxteis produzidos a partir de matérias-primas virgens e suas versões recicladas, buscando identificar o potencial de redução das emissões de carbono decorrente da substituição de materiais. Os resultados reunidos no estudo evidenciam reduções expressivas associadas à reciclagem de fibras e produtos têxteis. Para a lã, avaliada na configuração de fibra e considerando uma unidade funcional de 1 kg, verificou-se uma redução de 99,2 % nas emissões de CO₂e quando comparada à versão virgem. No caso da análise de camisetas de algodão, a substituição por algodão reciclado resultou em uma diminuição de 98,7 % nas emissões. Para tecidos de denim, com unidade funcional de 1,5 m² de tecido, a redução observada foi de 50 %. Já na produção de fios de algodão, considerando uma unidade funcional de 100 kg, a substituição de matéria-prima virgem por reciclada proporcionou uma redução de 60,2 % (Samuele Abagnato; Lucia Rigamonti; Mario Grosso, 2019).

Um estudo publicado por Bianco; Picerno; Blengini (2023) mapeou de forma detalhada a cadeia produtiva da lã e aplicou ACV para 19 coprodutos. A abrangência utilizada para a análise foi *cradle-to-gate*, com unidade funcional de 1 kg de produto de lã, seguindo as normas ISO 14040, 14044 e diretrizes europeias. A modelagem utilizou base de dados Ecoinvent. Dois tipos de produtos apresentados no estudo foram fios de lã tintos e não tingidos, avaliados via GWP100, com resultados de 97,2 kg CO₂e e 94,2 kg CO₂e, respectivamente.

Para avaliar as emissões de carbono associadas a camisetas compostas 100 % por lã merino, publicou-se um estudo por Bianco *et al.*, (2023) utilizando a

metodologia ACV. O estudo analisou uma camiseta preta produzida na Itália, adotando o modelo *cradle-to-gate* e a unidade funcional de uma peça com massa de 114,5 gramas. As fronteiras do sistema incluíram desde a produção da lã até a camiseta finalizada, considerando todas as etapas até a saída do produto do portão da fábrica confeccionista. Os dados utilizados nos cálculos foram obtidos diretamente das empresas da cadeia produtiva têxtil, complementados com base de dados Ecoinvent v3.7. A ACV foi conduzida conforme as normas ISO 14040 e ISO 14044, bem como as diretrizes da PEF. Os resultados, expressos pelo indicador GWP100 apontaram emissão de 11,7 kg de CO₂e por camiseta (Bianco *et al.*, 2023).

O artigo publicado por Fonseca *et al.*, (2023) apresentou uma revisão da literatura sobre ACV na indústria têxtil, com o objetivo de identificar os principais materiais abordados nos estudos da área e analisar criticamente os dados disponíveis referentes ao indicador GWP100 na cadeia têxtil, desde a produção da fibra até o produto final. Para essa revisão, os autores analisaram 73 estudos qualitativos e 39 quantitativos publicados entre 2008 e 2023, padronizando os resultados a partir da conversão para uma unidade funcional de 1 kg de produto. A busca bibliográfica foi realizada na base Scopus, e os *softwares* mais utilizados nos estudos avaliados foram SimaPro, GaBi e OpenLCA. No que se refere à metodologia, observou-se ampla adoção da abordagem *cradle-to-gate*. Os autores destacam que as decisões metodológicas, como a escolha do banco de dados e a modelagem dos processos, exercem influência significativa sobre os resultados, sendo essas variáveis fontes importantes de limitação para comparações diretas entre estudos. Embora a norma ISO 14006:2020 seja mencionada, as referências mais frequentes foram as normas clássicas da ACV, ISO 14040 e ISO 14044, utilizadas como base metodológica. Entre os resultados reunidos, observou-se grande variação nas emissões de carbono conforme o tipo de fibra e produto têxtil. A lã apresentou emissão de 95,70 kg CO₂e por quilograma de fibra, enquanto a seda atingiu 86,79 kg CO₂e por quilograma de tecido plano. O algodão registrou 18,50 kg CO₂e, seguido pelo cânhamo, com 13,52 kg CO₂e, e o linho, com 11,75 kg CO₂e para a mesma unidade funcional. O poliéster apresentou menor impacto relativo entre os materiais analisados, com 9,40 kg CO₂e por quilograma de tecido de malha (Fonseca *et al.*, 2023).

Um relatório técnico publicado pela Associação Industrial de Cânhamo da União Europeia (Van der Werf *et al.*, 2011) foi publicado com o objetivo de avaliar o ciclo de vida de produtos derivados do cânhamo. O estudo teve como propósito reunir

e comparar dados ACV disponíveis sobre diferentes rotas de processamento de fibras de cânhamo. A análise foi conduzida segundo a abordagem *cradle-to-gate*, utilizando uma unidade funcional de 1 tonelada de fibra. O trabalho baseou-se nos fundamentos metodológicos das normas ISO 14040 e ISO 14044 e teve como finalidade fornecer subsídios técnicos consistentes para a avaliação ambiental do setor têxtil e de materiais industriais. O escopo do sistema incluiu as etapas de cultivo do cânhamo, práticas agrícolas, maceração, separação mecânica das fibras, não sendo consideradas as etapas posteriores de fiação, tecelagem ou acabamento. A base de dados utilizada para a análise foi composta por inventários extraídos da literatura técnica e científica, contemplando estudos realizados em diferentes contextos europeus, principalmente na França, Bélgica e Alemanha. As variações metodológicas entre as fontes foram padronizadas pela unidade funcional e conversão dos resultados em indicador GWP100. Os dados apresentados indicaram emissões médias de 360 kg CO₂e por tonelada de fibra longa de cânhamo e 420 kg CO₂e por tonelada de fibra curta. Para fins comparativos, o algodão apresentou valores significativamente mais elevados, com 2100 kg CO₂e por tonelada, enquanto o poliéster variou entre 3000 e 4000 kg CO₂e por tonelada. A lã apresentou as maiores emissões entre as fibras avaliadas, com resultados entre 4000 e 5000 kg CO₂e por tonelada (Van der Werf *et al.*, 2011).

Após a avaliação de 20 estudos científicos apresentados ao longo desta sessão, baseados em metodologias ACV de diferentes produtos têxteis para avaliação do impacto ambiental GWP100, no Quadro 1 apresenta-se de forma resumida, os principais dados obtidos nas pesquisas supracitadas.

Quadro 1 – Dados de emissão de CO₂e obtidos na literatura científica com especificação de tipo e composição do produto avaliado

Substrato têxtil	Composição do produto	Especificação/ tipo	Modelo	Unidade funcional	Emissões em GWP100 (CO ₂ e)	Referência
Fibra	100 % algodão	Convencional	<i>Cradle-to-gate</i>	1 kg	3,6 kg	(Van Der Velden; Patel; Vogtländer, 2014)
Fibra	100 % algodão	Origem: CmiA - África	<i>Cradle-to-gate</i>	1 kg	1,04 kg	(Rana <i>et al.</i> , 2015a)
Fibra	100 % algodão	Convencional	<i>Cradle-to-gate</i>	1 kg	1,8 kg	
Fibra	100 % algodão	Convencional	<i>Cradle-to-gate</i>	1000 kg	268 kg	(Cotton Incorporated, 2021)
Fibra	100 % algodão	Convencional	<i>Cradle-to-gate</i>	1000 kg	2100 kg	(Van der Werf <i>et al.</i> , 2011)
Fibra	100 % algodão	Convencional	<i>Cradle-to-gate</i>	1 kg	2,7 kg	(Senn, 2022)
Fibra	100 % algodão	Convencional	<i>Cradle-to-gate</i>	1 kg	2,44 kg	(La Rosa; Grammatikos, 2019)
Fibra	100 % algodão	Orgânico	<i>Cradle-to-gate</i>	1 kg	0,98 kg	
Fibra	100 % algodão	Orgânico	<i>Cradle-to-gate</i>	1 kg	2,3 kg	(Senn, 2022)
Fibra	100 % algodão	Reciclado	<i>Cradle-to-gate</i>	1 kg	0,214 kg	(Esteve-Turrillas; De La Guardia, 2017)
Fio	100 % algodão	Origem: Ásia	<i>Cradle-to-gate</i>	1 kg	2,46 kg	(Rana <i>et al.</i> , 2015a)
Fio	100 % algodão	Origem: Europa	<i>Cradle-to-gate</i>	1 kg	1,25 kg	
Fio	100 % algodão	Convencional	<i>Cradle-to-gate</i>	1 kg	8,08 kg	(Fonseca <i>et al.</i> , 2023)
Tecido de malha crua (Jersey)	100 % algodão	Convencional	<i>Cradle-to-gate</i>	1 kg	1,115 kg	(Santos; Abreu, 2025)

Substrato têxtil	Composição do produto	Especificação/ tipo	Modelo	Unidade funcional	Emissões em GWP100 (CO ₂ e)	Referência
Tecido de malha crua (Jersey)	100 % algodão	100 % algodão orgânico	<i>Cradle-to-gate</i>	1 kg	0,77 kg	(Santos; Abreu, 2025)
Tecido de malha crua (Jersey)	100 % algodão	60 % algodão orgânico 40 % algodão convencional virgem	<i>Cradle-to-gate</i>	1 kg	0,897 kg	
Tecido de malha crua (Jersey)	100 % algodão	50 % algodão orgânico 50 % reciclado pós-industrial	<i>Cradle-to-gate</i>	1 kg	0,628 kg	
Tecido de malha crua (Jersey)	100 % algodão	60 % orgânico 20 % reciclado pós-industrial 20 % reciclado pós-consumo	<i>Cradle-to-gate</i>	1 kg	0,641 kg	
Tecido de malha	100 % algodão	Convencional	<i>Cradle-to-gate</i>	1000 kg	9070 kg	
Tecido plano	100 % algodão	Convencional	<i>Cradle-to-gate</i>	1000 kg	8760 kg	
Camiseta de malha	100 % algodão	50 % algodão reciclado pós-industrial	<i>Cradle-to-gate</i>	1 kg	3,12 kg	(Gonçalves <i>et al.</i> , 2024)
Camiseta de malha	100 % algodão	100 % algodão orgânico	<i>Cradle-to-gate</i>	1 kg	4 kg	
Camiseta de malha	100 % algodão	Convencional	<i>Cradle-to-gate</i>	1 kg	7,7 kg	
Fibra longa	100% linho	Convencional	<i>Cradle-to-gate</i>	1 kg	0,647 kg	(European Confederation of Flax and Hemp, 2022)
Fio	100% linho	Convencional	<i>Cradle-to-gate</i>	1 kg	13,60 kg	(Fonseca <i>et al.</i> , 2023)
Tecido técnico	100% linho	Convencional	<i>Cradle-to-gate</i>	360 g	7,79 kg	(Gomez-Campos <i>et al.</i> , 2021)

Substrato têxtil	Composição do produto	Especificação/ tipo	Modelo	Unidade funcional	Emissões em GWP100 (CO ₂ e)	Referência
Compósito	100% linho	Convencional	<i>Cradle-to-grave</i>	1 m ²	3,937 kg	(Marcinkowski; Poniecka; Barburski, 2025)
Fibra curta	100% cânhamo	Convencional	<i>Cradle-to-gate</i>	1000 kg	360 kg	(Van der Werf <i>et al.</i> , 2011)
Fibra longa	100% cânhamo	Convencional	<i>Cradle-to-gate</i>	1000 kg	420 kg	
Fio	100% cânhamo	Convencional	<i>Cradle-to-gate</i>	1 kg	14,6 kg	(Fonseca <i>et al.</i> , 2023)
Fibra	100 % lã	Convencional	<i>Cradle-to-gate</i>	1000 kg	4000 a 5000 kg	(Van der Werf <i>et al.</i> , 2011)
Fibra	100 % lã	Convencional	<i>Cradle-to-gate</i>	393 g	3,6 – 5,07 kg	(Nautiyal <i>et al.</i> , 2025)
Fibra	100 % lã	Convencional	<i>Cradle-to-gate</i>	1 kg	33,2 – 89,1	(Giuseppe Picerno <i>et al.</i> , 2022)
Fibra	100 % lã	Reciclada	<i>Cradle-to-gate</i>	1 kg	0,63 kg	(Giuseppe Picerno <i>et al.</i> , 2022)
Fibra	100 % lã	Reciclada	<i>Cradle-to-gate</i>	1 kg	0,7 kg	(Wiedemann <i>et al.</i> , 2020)
Fio	100 % lã	Convencional	<i>Cradle-to-gate</i>	1 kg	95,7 kg	(Fonseca <i>et al.</i> , 2023)
Fio cru	100 % lã	Convencional	<i>Cradle-to-gate</i>	1 kg	94,2 kg	(Bianco; Picerno; Blengini, 2023)
Fio tinto	100 % lã	Convencional	<i>Cradle-to-gate</i>	1 kg	97,2 kg	
Camiseta	100 % lã	Convencional	<i>Cradle-to-gate</i>	114,5 g	11,7 kg	(Bianco <i>et al.</i> , 2023)
Fibra	100 % seda	Convencional	<i>Cradle-to-gate</i>	1 kg	80,9 kg	(Miguel Astudillo; Gunnar Thalwitz; Fritz Vollrath, 2014)

Substrato têxtil	Composição do produto	Especificação/ tipo	Modelo	Unidade funcional	Emissões em GWP100 (CO ₂ e)	Referência
Tecido plano	100 % seda	Convencional	<i>Cradle-to-gate</i>	1 kg	80,9 kg	(Fonseca <i>et al.</i> , 2023)
Fibra	100 % poliéster	Convencional	<i>Cradle-to-gate</i>	1000 kg	3000 a 4000 kg	(Van der Werf <i>et al.</i> , 2011)
Fibra	100 % poliéster	Convencional	<i>Cradle-to-gate</i>	393 g	1,47 – 1,85 kg	(Nautiyal <i>et al.</i> , 2025)
Fibra	100 % poliéster	Convencional	<i>Cradle-to-gate</i>	1 kg	8,75 kg	(Van Der Velden; Patel; Vogtländer, 2014)
Fibra	100 % poliéster	Convencional	<i>Cradle-to-gate</i>	1 kg	3,3 – 4,6 kg	(Aravin Prince Periyasamy; Jiri Militky, 2020)
Fibra	100 % poliéster	Convencional	<i>Cradle-to-gate</i>	1000 kg	4,06 ton	
Tecido plano ou malha	100 % poliéster	Convencional	<i>Cradle-to-gate</i>	1 kg	14,90 kg	(Fonseca <i>et al.</i> , 2023)
Fibra	100 % poliéster	Reciclado mecânicamente	<i>Cradle-to-gate</i>	1000 kg	0,96 ton	(Aravin Prince Periyasamy; Jiri Militky, 2020)
Fibra	100 % poliéster	Reciclado por método semi-mecânica	<i>Cradle-to-gate</i>	1000 kg	1,88 ton	
Fibra	100 % poliéster	Reciclado quimicamente com BHET	<i>Cradle-to-gate</i>	1000 kg	2,59 ton	
Fibra	100 % poliéster	Reciclado quimicamente com DMT	<i>Cradle-to-gate</i>	1000 kg	3,08	
Fibra	100 % poliéster	Reciclado	<i>Cradle-to-gate</i>	1 kg	1,75 – 2,75 kg	
Fibra	100 % poliamida	Convencional	<i>Cradle-to-gate</i>	1 kg	2,7 kg	(Van Der Velden; Patel; Vogtländer, 2014)

Fonte: A autora (2025)

Alguns dos estudos encontrados na literatura não apresentaram dados absolutos de emissão de GEE, conforme os resultados apresentados no Quadro 1, mas sim análises comparativas entre a mesma matéria-prima, de diferente tipo, como convencionais e reciclados. Os dados para essas comparações encontram-se no Quadro 2.

Quadro 2 – Análises comparativas de emissão de materiais

Análise comparativa	Produto avaliado	Composição	Unidade funcional	Emissões GWP100 (CO ₂ e)	Referência
Lã virgem <i>versus</i> lã reciclada	Fibra	100 % lã	1 kg	- 99,2 %	(Samuele Abagnato; Lucia Rigamonti; Mario Grosso, 2019)
Algodão virgem <i>versus</i> algodão reciclado	Fio	100 % algodão	100 kg	- 60,2 %	
Algodão virgem <i>versus</i> algodão reciclado	Tecido plano	100 % algodão	1,5 m ²	- 50 %	
Algodão virgem <i>versus</i> algodão reciclado	Camiseta de malha	100 % algodão	1 camiseta	- 98,7 %	
Camiseta de algodão 30 % convencional 70 % orgânico <i>versus</i> 100 % algodão reciclado pós-consumo	Camiseta de malha	100 % algodão	1 camiseta	- 30,7 %	(Gonzalez; Lou; Chi, 2023a)

Fonte: A autora (2025)

O estudo de Abagnato *et al.*, (2019) reúne 45 publicações de ACV aplicadas em estratégias circulares, incluindo produtos reciclados e seus efeitos relacionados às emissões de GEE através de GWP100. Foram relatadas reduções de 50,0 a 99,2 % das emissões ao substituir materiais virgens por reciclados (Samuele Abagnato; Lucia Rigamonti; Mario Grosso, 2019).

A publicação de Gonzalez; Lou; Chi (2023b) aplicou a metodologia ACV para comparar os impactos ambientais associados à produção e uso de duas camisetas fabricadas na Itália, feitas com diferentes matérias-primas, sendo elas: camiseta A, composta por algodão virgem 30 % convencional e 70 % orgânico, e a camiseta B, confeccionada com algodão 100 % reciclado pós-consumo. A análise foi estruturada

sob abordagem *cradle-to-grave*, considerando todas as etapas do ciclo de vida do produto, desde a extração da matéria-prima até o seu descarte final, com unidade funcional de 1 camiseta. A modelagem do sistema foi realizada no *software* SimaPro 9.3, utilizando como base de dados o Ecoinvent v3.8, e os impactos foram avaliados conforme as diretrizes das normas ISO 14040 e ISO 14044. Os processos considerados incluíram o cultivo do algodão, transporte de matéria-prima, fiação, malharia, tingimento, costura, embalagem, distribuição, uso e descarte. Em relação às emissões de gases de efeito estufa, os resultados apontaram que a camiseta A apresentou emissão de 5,54 kg CO₂e por peça, enquanto a camiseta B resultou em 3,84 kg CO₂e, representando redução de 30,70 % da opção virgem para a reciclada. A maior contribuição para o impacto da camiseta de algodão virgem foi o cultivo da matéria-prima, enquanto para a camiseta B, de algodão reciclado, os destaques foram os processos industriais, principalmente o tingimento e a confecção. Os autores destacam a importância de se priorizar insumos reciclados na cadeia têxtil e reforçam que os benefícios ambientais só são efetivos quando acompanhados de práticas eficientes nos processos industriais. O estudo reforça o papel da ACV como ferramenta estratégica para o *ecodesign* e a tomada de decisão sustentável no setor de vestuário (Gonzalez; Lou; Chi., 2023b).

Os dados obtidos na literatura evidenciam uma ampla variação nos valores de emissões de carbono atribuídos às fibras têxteis, o que reforça a complexidade metodológica inerente aos estudos baseados em ACV. Essa variabilidade decorre, sobretudo, das diferenças entre as ferramentas utilizadas em cada estudo, bases de dados adotadas em cada caso, metodologias, limites do sistema e localizações geográficas consideradas. A matriz energética do país analisado, em especial, exerce influência significativa nas variações encontradas, uma vez que a intensidade das emissões na geração de eletricidade direciona o impacto dos processos. Além disso, variações nas práticas agrícolas, eficiência tecnológica, escala produtiva e tipo de transporte contribuem para ampliar ainda mais a dispersão dos valores reportados.

2.4 CONSIDERAÇÕES SOBRE O ESTADO DA ARTE

A literatura científica sobre ACV utilizando substratos têxteis tem avançado principalmente por meio de comparações entre materiais, com foco recorrente em fibras como algodão, poliéster e lã. Embora os dados de impacto climático, expressos

pelo GWP100, sejam relevantes, ainda há uma lacuna metodológica por estudos que traduzam esses resultados em estratégias de substituição de fibras baseadas em propriedades e desempenho têxtil, conectando de forma direta o impacto ambiental produto final.

Quanto ao modelo *cradle-to-gate*, é adequado quando o objetivo é isolar e mitigar impactos industriais de aquisição de fibras e fabricação, etapas reconhecidas como determinantes e menos sujeitas à variabilidade comportamental do uso, cuja contribuição e dispersão estão amplamente documentadas nos estudos avaliados até o presente momento. Além disso, diversos estudos de referência em têxteis adotam essa abordagem para reportar dados robustos de processo.

Dentre diversas calculadoras existentes, optou-se pela utilização da The 2030 Calculator por oferecer uma ferramenta transparente e parametrizável para a quantificação de emissões de carbono, contemplando variáveis como materiais, massas, origens, processos, modelos logísticos, energia e embalagens. A plataforma adota metodologia alinhada aos padrões de ACV e ao método *cradle-to-gate* deste estudo, além de apresentar base de dados em comum com estudos públicos, é consolidada e sua base de dados principal é amplamente reconhecida pela literatura científica, o que indica confiabilidade e comparabilidade aos resultados obtidos. Outro diferencial altamente relevante da The 2030 Calculator, que demonstrou ser a melhor ferramenta para o presente trabalho, é seu alto potencial de personalização, tanto na configuração do produto avaliado quanto na definição de todo o seu fluxo produtivo, permitindo inserir *inputs* específicos para a indústria têxtil. Essa característica foi apontada na literatura como um fator que aproxima os resultados da realidade e evita distorções por elevado grau de arredondamento de dados, agregando maior precisão das emissões calculadas.

Diante do exposto, a contribuição desta dissertação de mestrado é dupla. Primeiro, quantificar as emissões de GEE via GWP100 associadas às fibras têxteis selecionadas em condições industriais. Segundo aplicar esses resultados em propostas de substituições estratégicas que respeitem alguma equivalência funcional dos tecidos, podendo abranger propriedades mecânicas, térmicas, conforto e/ ou durabilidade, de modo a identificar rotas que preservem o desempenho ao mesmo tempo em que minimizem as emissões de carbono. Essa sinergia entre ACV e decisão técnico-comercial enfrenta uma lacuna do estado da arte e fornece instrumentos

práticos de *ecodesign* para marcas e confecções, contribuindo diretamente para os ODS 12 e 13.

3 METODOLOGIA

O conteúdo apresentado nesta etapa refere-se à metodologia adotada neste trabalho, estruturada para investigar, quantificar e propor substituições das fibras têxteis escolhidas na etapa de desenvolvimento de produtos para a redução das emissões de CO₂e, contribuindo com a implementação de metodologias de *ecodesign*, através dos dados obtidos com a ferramenta The 2030 Calculator.

A abordagem *cradle-to-gate* foi definida como fronteira do sistema com o objetivo de analisar a influência da escolha das diferentes fibras na etapa de manufatura do produto, desconsiderando as emissões relacionadas à distribuição, ao uso e ao descarte. Essas fases posteriores não foram incluídas por envolverem alta variabilidade e complexidade, além de não estarem diretamente alinhadas ao escopo deste estudo. Embora o modelo *cradle-to-gate* apresente valores de emissões inferiores quando comparado a análises mais abrangentes relacionados ao ciclo de vida, uma vez que as emissões continuam a ocorrer nas fases de uso e fim de vida, ele permite uma avaliação mais controlada dos impactos associados à etapa produtiva. Além disso, trata-se de uma abordagem amplamente utilizada na literatura para investigações focadas na origem dos materiais e nos processos de produção.

A base de dados Ecoinvent versão 3.9.1 foi utilizada como fonte primária pela calculadora, em conjunto com a metodologia *Allocation, cut-off by classification*, que baseia-se na avaliação dos impactos de materiais virgens e reciclados, atribuindo as emissões à etapa inicial da cadeia produtiva. Ou seja, as emissões relacionadas à aquisição das fibras são contabilizadas apenas para insumos virgens. A base Ecoinvent é reconhecida por sua relevância para estudos de ACV, usada amplamente pela comunidade acadêmica, empresas e governos (Nautiyal *et al.*, 2025). Seu extenso banco de dados cobre milhares de processos industriais, energéticos e de transporte, permitindo uma modelagem detalhada e precisa das cadeias produtivas, além de ser a principal base de dados utilizada por *softwares* para aplicação de ACV, como SimaPro, OpenLCA e GaBi, e está alinhada com as diretrizes das normas ISO 14040 e ISO 14044 (Steubing *et al.*, 2016).

A escolha da base de dados utilizada em ferramentas de cálculo de carbono é um dos elementos que mais influenciam os resultados de uma ACV. Isso ocorre porque cada base possui pressupostos próprios relacionados à modelagem dos

processos, tratamento e consolidação dos dados, ano de referência dos inventários, frequência de atualização, critérios de arredondamento e demais parâmetros metodológicos. Essas diferenças estruturais podem gerar variações significativas nos valores finais de emissões reportados para um mesmo produto. Estudos comparativos indicam que a substituição de uma base de inventário por outra pode alterar substancialmente os resultados das emissões de carbono, evidenciando que a consistência da análise está diretamente vinculada à qualidade, transparência e robustez dos dados utilizados (Bauer *et al.*, 2021; Ciroth *et al.*, 2020).

Dessa forma, a base de dados não representa apenas um insumo técnico da modelagem, mas constitui o fundamento sobre o qual toda a avaliação é construída. Quando diferentes estudos utilizam bases distintas, as premissas metodológicas deixam de ser equivalentes, comprometendo a comparabilidade e reduzindo a confiabilidade das conclusões. Para que análises sejam comparáveis e cientificamente consistentes, é essencial que estejam ancoradas em uma mesma estrutura de inventário, assegurando alinhamento nos critérios de modelagem e nos dados de referência.

Nesse contexto, a Ecoinvent destaca-se como uma das bases de dados mais utilizada em estudos acadêmicos publicados em periódicos de alto impacto, bem como em relatórios técnicos desenvolvidos por organizações internacionais, governos e empresas. Trata-se da principal base integrada a *softwares* consolidados de ACV, sendo amplamente reconhecida pela comunidade científica.

Por essa razão, a Ecoinvent foi adotada como base de referência tanto para a seleção de dados da literatura quanto para a modelagem conduzida na ferramenta The 2030 Calculator, garantindo coerência metodológica, maior confiabilidade dos resultados e solidez na comparação das emissões de carbono entre as diferentes fibras têxteis analisadas.

Para esta dissertação, foram selecionadas camisetas como produto de estudo, todas confeccionadas com a mesma construção e padronagem de tecido, além de variáveis controladas e padronizadas ao longo de todo o processo produtivo. Entre as variáveis mantidas constantes, destacam-se a origem geográfica das matérias-primas, localização dos fornecedores e das etapas de fabricação, configuração do fluxo produtivo, fonte e consumo energético, massa do produto final, tipo de embalagem e método de transporte utilizado na logística da cadeia de suprimentos.

A única variável intencionalmente alterada entre as amostras foi o tipo de fibra têxtil utilizada em cada camiseta. Esse controle permite o isolamento da emissão de carbono relacionada especificamente à fibra, foco central da análise. Para eliminar a influência das emissões relacionadas ao transporte de insumos de diferentes localizações geográficas, todos os fornecedores e processos foram fixados em uma única localidade, sendo ela a cidade de Blumenau, no estado de Santa Catarina, Brasil, um dos principais e mais relevantes polos do setor têxtil brasileiro. Embora essa configuração não represente a complexidade real das cadeias de suprimentos têxteis globais, foi adotada estrategicamente para reduzir interferências e garantir a comparação entre os diferentes cenários avaliados, de modo a concentrar a análise na influência da fibra têxtil nas emissões de CO₂e no desenvolvimento de produtos.

Foram selecionadas onze camisetas em diferentes composições têxteis para realização da avaliação, comparação e proposta de substituição. O algodão, lã, poliéster e poliamida 6, todos em suas versões convencionais, foram selecionados como padrão para fins comparativos com outras fibras, consideradas aptas para serem usadas nas mesmas aplicações de produtos e por apresentarem características técnicas e comerciais similares. O padrão foi determinado com base no volume produtivo mundial, apresentado na Figura 4, ou seja, as fibras usadas como padrão são as mais produzidas no cenário global quando comparadas com as outras fibras da análise comparativa, dadas as suas relevâncias em produção e consumo. O Quadro 3 apresenta a estrutura comparativa definida.

Quadro 3 – Padrões e análises comparativas do estudo

Avaliação	Padrão utilizado	Fibra de comparação
Comparação 1	Algodão convencional (CO 1)	Algodão reciclado (CO 2)
Comparação 2	Algodão convencional (CO 1)	Algodão orgânico (CO 3)
Comparação 3	Algodão convencional (CO 1)	Linho (CL)
Comparação 4	Algodão convencional (CO 1)	Cânhamo (CA)
Comparação 5	Lã convencional (WO 1)	Lã reciclada (WO 2)
Comparação 6	Poliéster convencional (PES)	Poliéster reciclado (rPET)
Comparação 7	Poliéster convencional (PES)	Poliamida 6 (PA)
Comparação 8	Poliéster convencional (PES)	Lã convencional (WO 1)
Comparação 9	Poliamida 6 (PA)	Seda (SE)

Fonte: A autora (2025)

Fontes acadêmicas foram utilizadas pela ferramenta como base de dados secundária, para complementar os dados fornecidos pelo Ecoinvent, conforme apresentado no Quadro 4.

Quadro 4 – Base de dados utilizada para cada fibra têxtil

Identificação	Fibra têxtil e tipo	Descrição do tipo de fibra e obtenção	Base de dados
CO 1	Algodão convencional	Processo de cultivo de algodão convencional. Colheita, descaroçamento e prensa em fardos para o envio.	Ecoinvent 3.9.1
CO 2	Algodão reciclado	Processo refere-se às fibras de algodão recicladas. Abrange as emissões provenientes da coleta, triagem e desfibragem de tecidos de algodão para a obtenção de fibra de algodão reciclada.	Miljögraff, 2016
CO 3	Algodão orgânico	O processo refere-se à semente de algodão cultivado organicamente, que é descaroçada e prensada em fardos para o envio.	Ecoinvent 3.9.1
WO 1	Lã convencional	O processo refere-se à produção convencional de fibra de lã. A produção de lã bruta foi baseada nos dados do Ecoinvent, enquanto o tratamento da fibra e preparação do substrato para fiação foi adotado de Bianco <i>et al.</i> , 2022.	Ecoinvent 3.9.1 & Bianco <i>et al.</i> , 2022
WO 2	Lã reciclada	A ACV da lã reciclada utiliza resíduos de lã pós e pré-consumo como insumo para a produção de lã reciclada, destinada à fiação. O conjunto de dados foi derivado de uma cadeia de valor específica localizada na Itália, sendo aplicado como um valor médio representativo.	Ecoinvent 3.9.1 & Bianco <i>et al.</i> , 2022
SE	Seda convencional	O processo refere-se à produção de fibras de seda, ao desvincular os filamentos dos casulos. As etapas envolvidas incluem a secagem em estufa, cozimento dos casulos, desenrolar dos filamentos e bobinagem.	Ecoinvent 3.9.1
CL	Linho convencional	O processo refere-se à produção de fibra de linho, proveniente do caule da planta.	Ecoinvent 3.9.1
CA	Cânhamo convencional	O processo refere-se à produção de fibra de kenaf. A fibra é obtida por meio da imersão do vegetal em água. Após vários dias de imersão, a fibra se solta do caule e é extraída manualmente da planta retificada. Em seguida, a fibra é seca ao sol.	Ecoinvent 3.9.1
PES	Poliéster convencional	O processo refere-se à produção de polietileno tereftalato (PET), utilizado na fabricação de poliéster têxtil.	Ecoinvent 3.9.1
rPET	Poliéster reciclado	Refere-se à produção de polietileno tereftalato (PET) reciclado, utilizado na fabricação de poliéster têxtil. O processo inicia-se com o recebimento de resíduos de PET previamente separados, para a produção de grânulos PET.	Ecoinvent 3.9.1

PA	Poliamida 6	O processo refere-se à produção da poliamida 6, composta por um único monômero, diferente da poliamida 6.6.	Ecoinvent 3.9.1
----	-------------	---	-----------------

Fonte: Adaptado de Omnical Solutions (2024a)

As análises comparativas foram definidas com base na estética, aplicabilidade e características das diferentes fibras têxteis, ou seja, mesmo as comparações sendo realizadas com diferentes classificações de materiais, como vegetais, animais e sintéticas, são substratos que comercialmente podem ser usados como alternativas em produtos têxteis.

Quanto a fibra de algodão, foi selecionado o convencional, reciclado e orgânico. A definição se justifica por tratar-se da fibra natural mais utilizada globalmente, correspondendo a 19,9 % da produção mundial de fibras têxteis e ocupando a segunda posição no ranqueamento de produção geral entre todos os substratos (Textile Exchange, 2024). A comparação 3 e 4, por sua vez, compararam o algodão convencional com o linho e o cânhamo, fibras naturais de origem vegetal, compostas predominantemente por celulose, assim como o algodão. Essas fibras compartilham propriedades semelhantes, como elevada absorção de umidade, rigidez, baixa elasticidade e elevada resistência mecânica em estado seco, toque vegetal natural característico e caimento estruturado no produto acabado (Cook, 2001).

A comparação 5 teve como objetivo comparar a lã convencional com sua versão reciclada. Reconhecida como uma das fibras têxteis mais nobres e de maior valor agregado, a lã distingue-se por sua origem animal e por um conjunto de propriedades funcionais superiores, como elasticidade natural, elevada capacidade de absorção de umidade, conforto térmico, resistência ao amassamento e características termorreguladoras. O material é obtido a partir da tosa de ovelhas e suas propriedades conferem versatilidade para a fibra, permitindo sua aplicação em produtos adequados a diferentes condições e estações do ano (W. S. Simpson; G. Crawshaw, 2002).

A comparação 6 refere-se à comparação entre poliéster convencional e reciclado, especialmente relevante por se tratar da fibra mais consumida do mundo, representando 57,2 % da produção mundial (Textile Exchange, 2024). A sétima comparação, entre poliéster convencional e poliamida 6, ambas as fibras sintéticas,

utilizadas amplamente em diversos tipos de produtos e nichos, como casual, esportivo, moda praia, têxteis arquitetônicos e decoração (Deopura *et al.*, 2008).

A comparação 8, entre poliéster e lã, ambos convencionais, por tratar-se de uma substituição cada vez mais comum, em que têxteis sintéticos de poliéster passam por processos e acabamentos para tornarem-se esteticamente parecidos com tecidos de lã, uma vez que sintéticos possuem custos generosamente menores, além de maior controle produtivo. Um típico exemplo são estruturas de tecido não-tecido, em que fibras de poliéster passam por processo de cardagem, seguido de agulhamento, para obter a consolidação mecânica das fibras, criando materiais resistentes e com aparência semelhante ao não-tecido de lã, ideais para peças de inverno (Wang, 2006).

Por fim, a comparação 9 avalia a poliamida 6 e a seda, representando, respectivamente, uma fibra sintética e uma fibra natural de origem animal. Desenvolvida pela DuPont na década de 1930, a poliamida surgiu como uma proposta de substituição à seda natural, em razão à sua escassez e elevado custo. Projetada para apresentar brilho, toque macio e superfície lisa, atributos marcantes da seda, a poliamida também compartilha semelhanças estruturais em nível molecular, como a presença de grupos amida, que se assemelham a estrutura peptídica da proteína natural, presente na seda. Além disso, a possibilidade de extrusão da poliamida em filamentos ultrafinos, classificadas como microfibras, permite a reprodução da delicadeza e finura típicas da seda, viabilizando sua aplicação em produtos que exigem leveza, conforto térmico e estética refinada. Por ser um polímero sintético, a poliamida oferece vantagens como menor custo, maior disponibilidade e facilidade de controle nos processos produtivos, consolidando-se como uma alternativa funcional em diversas aplicações têxteis (Deopura *et al.*, 2008).

A unidade funcional adotada foi de 100 gramas de fibra têxtil para produção de fio, e posteriormente o tecido de malha. Foram desconsideradas perdas ou ganhos de massa ao longo dos processos. A massa do produto acabado, ou seja, das camisetas, também foi considerada com 100 gramas. A definição dessa unidade funcional teve como objetivo aproximar os resultados da realidade de mercado, permitindo estimar, de forma tangível, as emissões de carbono associadas a peças amplamente consumidas no varejo e, assim, tornar mais perceptível o impacto ambiental do produto ao longo da etapa produtiva.

Quanto ao fluxo produtivo, foi necessário considerar uma distinção entre materiais de diferentes origens. Fibras sintéticas requerem uma etapa prévia de

produção da fibra antes da fiação, enquanto materiais têxteis naturais, por estarem disponíveis na configuração de fibra na natureza, não necessitam dessa etapa adicional. Essa diferença foi devidamente incorporada ao modelo de avaliação, garantindo maior precisão na contabilização dos impactos ao longo do ciclo de vida dos produtos, focado na aquisição do material. Em contrapartida, foi considerado no fluxo para as fibras naturais, tanto vegetais, quanto animais, uma etapa adicional, sendo o alvejamento e limpeza das fibras, etapa esta que não foi considerada para os materiais sintéticos, que passam apenas por uma lavação tradicional para remoção dos óleos de encimagem antes do tingimento em batelada. Esta lavação foi considerada integrada com o processo de tingimento da ferramenta. Para as fibras naturais, o alvejamento foi considerado como uma etapa extra, uma vez que as especificações da ferramenta indicam que o branqueamento é direcionado para esta classificação.

Com base nas possíveis substituições de fibras têxteis apresentadas e as comparações propostas, as onze camisetas selecionadas como produtos acabados, foram definidas para serem confeccionadas com o mesmo substrato têxtil, sendo ele tecido de malha, em diferentes composições têxteis para serem avaliadas através dos dados da ferramenta The 2030 Calculator, conforme apresentado no Quadro 5.

Quadro 5 – Produtos selecionados para avaliação

Produtos				
Produto acabado	Fibra têxtil (composição)	Sigla do material	Classificação do material	Tipo de material
Camiseta	100% algodão	CO 1	Natural vegetal	Convencional
Camiseta	100% algodão	CO 2	Natural vegetal	Reciclado
Camiseta	100% algodão	CO 3	Natural vegetal	Orgânico
Camiseta	100% linho	CL	Natural vegetal	Convencional
Camiseta	100% cânhamo	CA	Natural vegetal	Convencional
Camiseta	100% lã	WO 1	Natural animal	Convencional
Camiseta	100% lã	WO 2	Natural animal	Reciclado
Camiseta	100% seda	SE	Natural animal	Convencional
Camiseta	100% poliéster	PES	Sintético	Convencional
Camiseta	100% poliéster	rPET	Sintético	Reciclado

Camiseta	100% poliamida 6	PA	Sintético	Convencional
----------	------------------	----	-----------	--------------

Fonte: A autora (2025)

Com base nos dados obtidos a partir das propostas de substituição, foi realizada uma avaliação para quantificar quais substituições podem contribuir com as diretrizes dos ODS e com as metas climáticas estabelecidas pelo Acordo de Paris. Essa avaliação busca compreender a relevância da escolha de fibras de menor impacto, segundo o indicador GWP100, e identificar seus impactos nas emissões totais dos produtos acabados, definidos no presente estudo como camisetas, através dos dados obtidos pela ferramenta The 2030 Calculator.

A seguir, será apresentada a configuração utilizada na ferramenta. No Anexo 1 é explanado todo o funcionamento da plataforma e possibilidades para obtenção dos resultados em diferentes tipos de produtos e fluxos produtivos.

3.1 CONFIGURAÇÃO DA CALCULADORA

Esta seção refere-se à configuração utilizada na plataforma The 2030 Calculator para obtenção dos dados avaliados no presente estudo, contemplando as quatro seções de *inputs*, que diz respeito às fases de dados de entrada na ferramenta.

A primeira seção da ferramenta, trata-se das informações gerais do produto, contemplando os *inputs* para todos os itens avaliados. A primeira informação que deve ser preenchida na ferramenta, é o nome do produto, para fins de identificação do artigo que será estudado. Nos *inputs* das onze camisetas que serão analisadas, os nomes dos produtos utilizados foram definidas como as siglas das respectivas fibras presentes em suas composições, apresentadas na primeira coluna do Quadro 6. A categoria do produto foi classificada como “vestuário”, enquanto para tipo de produto, selecionou-se “camiseta”. A massa do produto é de 100 g de camiseta, desconsiderando a massa da embalagem do produto.

A seção 2, referente aos materiais e processos utilizados para fabricação do tecido, envolve a escolha da fibra têxtil utilizada no artigo, tipo de tecnologia para a manufatura do substrato, fonte e consumo de energia, fluxo produtivo, respectivas localizações de execução de cada etapa produtiva e tipo de transporte, conforme apresentado no Quadro 6.

Quadro 6 – Configuração da Seção 2 da ferramenta The 2030 Calculator

SEÇÃO 2							
Nome do produto	Nome da parte	Categoria do material	Subcategoria	Tipo do material	Massa (g)	Localização do fornecedor	Tipo de transporte
CO 1	Fibras de algodão	Material Têxtil Cru	Algodão	Convencional	100	Blumenau, Santa Catarina, Brasil	Caminhão de Tamanho Médio
CO 2	Fibras de algodão	Material Têxtil Cru	Algodão	Reciclado	100		
CO 3	Fibras de algodão	Material Têxtil Cru	Algodão	Orgânico	100		
CL	Fibras de linho	Material Têxtil Cru	Linho	Convencional	100		
CA	Fibras de cânhamo	Material Têxtil Cru	Cânhamo	Convencional	100		
WO 1	Fibras de lã	Material Têxtil Cru	Lã	Convencional	100		
WO 2	Fibras de lã	Material Têxtil Cru	Lã	Reciclado	100		
SE	Fibras de seda	Material Têxtil Cru	Seda	Convencional	100		
PES 1	Fibras de poliéster	Material Têxtil Cru	Poliéster	Convencional	100		
rPET	Fibras de poliéster	Material Têxtil Cru	Poliéster	Reciclado	100		
PA	Fibras de poliamida	Material Têxtil Cru	Poliamida	Convencional	100		

Fonte: A autora (2025)

Conforme mencionado anteriormente, as variáveis de localização dos fornecedores e tipo de transporte foram padronizadas para eliminar variações nos resultados, uma vez que se deseja avaliar especificamente as emissões CO₂e de diferentes fibras têxteis, sem a interferência de emissões de transporte e localizações geográficas distintas. Optou-se por padronizar a cidade de Blumenau, Santa Catarina, Brasil como localização para todos os fornecedores e origens, em todas as seções da calculadora. Da mesma forma, para o tipo de transporte, a opção “caminhão de

tamanho médio” foi utilizada para todos os deslocamentos considerados na análise, por ser um dos métodos de transporte de carga convencional no Brasil. É importante destacar que essa decisão metodológica influencia diretamente os resultados obtidos. As emissões associadas ao transporte podem representar parcela relevante nas emissões de carbono de um produto têxtil, especialmente quando há cadeias globais de suprimento, importação de fibras ou deslocamentos entre múltiplas etapas produtivas. Na prática industrial, o transporte de insumos entre diferentes indústrias, etapas de fabricação, centros de distribuição e pontos de venda é significativa para o total de emissões de um fluxo produtivo, podendo alterar substancialmente os valores finais reportados em estudos ACV. Ao padronizar essa variável, reduz-se a variabilidade associada à logística e isola-se o impacto intrínseco da fibra na etapa produtiva, ainda que isso implique na não representação integral da dinâmica logística observada em cadeias globais reais.

Para fonte de energia, foi selecionada “mescla de energia nacional” em todas as etapas e seções, que considera a média do consumo de energia do país selecionado na localização de fabricação.

Ainda na Seção 2, determinou-se o fluxo produtivo do tecido, apresentados no Quadro 7. Para materiais naturais, como algodão, linho, cânhamo, lã e seda, o fluxo produtivo começa na fiação, pois as fibras já estão aptas para entrar na cadeia produtiva, além de passarem por uma fase extra relacionada a preparação ao tingimento, promovendo a limpeza do material, brancura e remoção de impurezas das fibras (Salem, 2010). Para materiais sintéticos, como poliéster e poliamida, o fluxo produtivo tem início na etapa de produção das fibras, por meio do processo de fiação por fusão, antes de avançar para a fiação e demais etapas subsequentes. O método fiação por fusão foi selecionado na plataforma por se tratar do processo predominante na fabricação de fibras sintéticas (Cook, 2001; Woodings, 2001).

Com exceção da etapa de fabricação da fibra para materiais sintéticos e etapa de preparação ao tingimento para fibras naturais, o fluxo produtivo de todos os artigos foi o mesmo, com o objetivo de padronizar as variáveis do processo.

Quadro 7 – Configuração da Seção 2, referente aos processos industriais para fabricação do tecido na ferramenta The 2030 Calculator

Seção 2 – Processos						
Fibras selecionadas e inputs	Categoria do processo	Processo	Fonte de energia	Intensidade de energia (kWh/kg)	Localização do processo	Tipo de transporte
CO 1 CO 2 CO 3 CL CA WO 1 WO 2 SE	Produção do fio	Fiação anel para malharia	Mescla de energia nacional	4,91	Blumenau, Santa Catarina, Brasil	Caminhão de Tamanho Médio
	Produção do tecido	Malharia		0,27		
	Preparação	Preparação, alvejamento e limpeza		0,01		
	Tingimento	Tingimento em batelada		0,55		
	Acabamento	Acabamento do tecido de malha		0,42		
PES 1 rPET PA	Produção da fibra	Fiação por fusão		1,5		
	Produção do fio	Fiação anel para malharia		4,91		
	Produção do tecido	Malharia		0,27		
	Preparação e tingimento	Preparação e tingimento em batelada		0,55		
	Acabamento	Acabamento do tecido de malha		0,42		

Fonte: A autora (2025)

No *input* preparação e tingimento, o processo refere-se à preparação do substrato e tingimento em batelada. Os corantes considerados para os cálculos finais são dispersos e reativos, determinados intrinsecamente pela própria opção de “tingimento em batelada” da ferramenta, de acordo com a matéria-prima. Considera-se que o tecido é seco entre as diferentes etapas à úmido. A fase de acabamento refere-se à finalização do tecido de malha, considerando uso de produtos químicos, como amaciantes e agentes antirrugas. Em todos os *inputs* voltados para escolha de

fonte de energia, em que foi selecionado “mescla de energia nacional”, foi considerado um padrão de acordo com o país de produção, dados provenientes da base Ecoinvent, e assim, a própria ferramenta preenche os dados de intensidade de energia na Seção 2 (Omnical Solutions, 2024a). A Figura 10 apresenta o fluxo produtivo para fabricação do tecido de malha com matérias-primas naturais, indicando método utilizado em cada etapa de produção, descrição da etapa e base de dados utilizada, conforme informações fornecidas pela própria interface da calculadora.

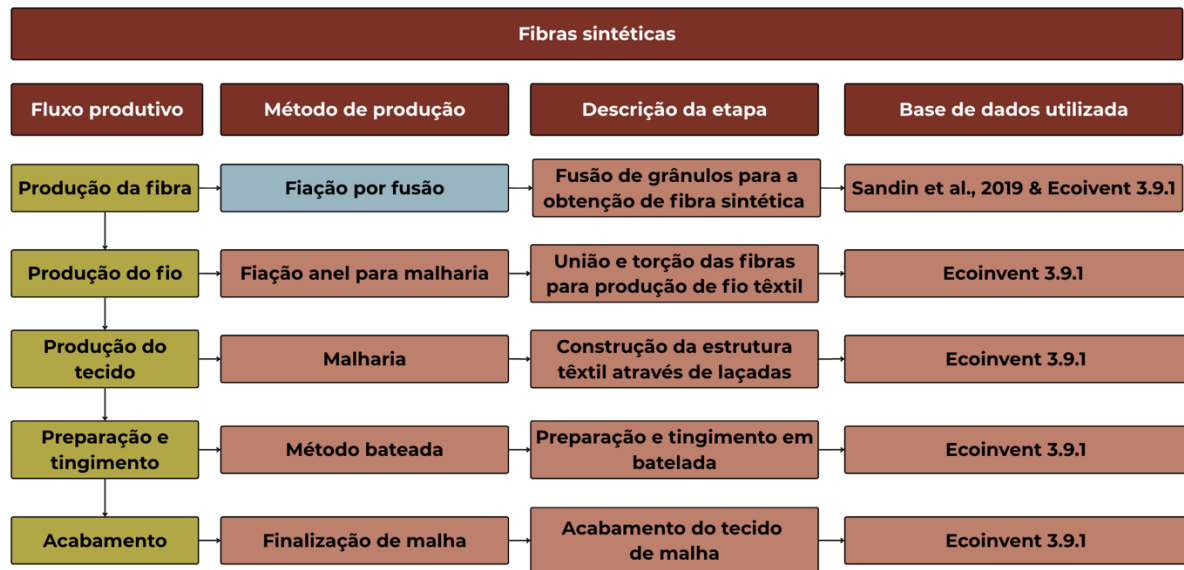
Figura 10 – Especificações do fluxo produtivo para fibras naturais



Fonte: Adaptado de (Omnical Solutions, 2024a)

Da mesma forma, a Figura 11 apresenta o fluxo produtivo para produção de tecidos de malha utilizando matérias-primas sintéticas. Em azul destaca-se, para cada figura, a excepcionalidade do processo, de acordo com a matéria-prima.

Figura 11 – Especificações do fluxo produtivo para fibras sintéticas



Fonte: Adaptado de (Omnical Solutions, 2024a)

A terceira seção da plataforma está relacionada com a embalagem do produto acabado. Para todos os itens, foi selecionada a mesma embalagem, em polipropileno (PP) com massa de 10 gramas. A localização do fornecedor e tipo de transporte manteve o padrão utilizado em toda a configuração da ferramenta.

A quarta seção, referente ao processo de confecção das camisetas, possui *inputs* relacionados a localização da confecção, centro de distribuição, fonte de energia e tipo de transporte, em que foram mantidas as variáveis padrão já citadas.

A quinta seção da ferramenta corresponde aos *outputs*, isto é, aos resultados gerados pelo software a partir das informações inseridas nas etapas anteriores. A calculadora apresenta seis indicadores, sendo cinco parciais, referentes à aquisição do material, processamento do tecido, confecção, embalagem e logística/distribuição, e um total, que representa a soma de todas as etapas. O último indicador, portanto, expressa a emissão total de carbono do produto acabado, integrando todos os estágios do modelo *cradle-to-gate*. Os resultados são disponibilizados em duas formas, sendo elas em quilogramas de dióxido de carbono equivalente (kg CO₂e) e em percentuais, calculados com base na emissão total do produto.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção, serão apresentados os resultados obtidos a partir da aplicação da metodologia na ferramenta The 2030 Calculator.

4.1 EMISSÃO DE CARBONO NA PRODUÇÃO DE CAMISETAS E ANÁLISE COMPARATIVA DE IMPACTO GWP100

Na Tabela 1 demonstra-se o *output* da ferramenta utilizada, ou seja, os resultados apresentados pela interface da plataforma após a aplicação da metodologia descrita no presente estudo. A segunda coluna do quadro indica a emissão total de cada camiseta, considerando a unidade funcional de 100 g, calculada a partir da soma das emissões das cinco colunas subsequentes: aquisição do material, fabricação do tecido, confecção, embalagem e distribuição.

Tabela 1 – Emissões totais e parciais de CO₂e obtidas para camisetas de 100 g em cada fase de fabricação utilizando a ferramenta The 2030 Calculator

Nome do produto	Emissão total (kg CO ₂ e)	Aquisição do material (kg CO ₂ e)	Fabricação do tecido (kg CO ₂ e)	Confecção (kg CO ₂ e)	Embalagem (kg CO ₂ e)	Distribuição (kg CO ₂ e)
CO 1	1,43	0,49	0,83	0,08	0,02	0
CO 2	1,01	0,07	0,83	0,08	0,02	0
CO 3	1,04	0,10	0,83	0,08	0,02	0
CL	1,14	0,20	0,83	0,08	0,02	0
CA	1,16	0,22	0,83	0,08	0,02	0
WO 1	14,03	13,09	0,83	0,08	0,02	0
WO 2	1,05	0,11	0,83	0,08	0,02	0
SE	25,98	25,04	0,83	0,08	0,02	0
PES	1,56	0,55	0,90	0,08	0,02	0
rPET	1,29	0,27	0,90	0,08	0,02	0
PA	2,62	1,60	0,90	0,08	0,02	0

Fonte: A autora (2025)

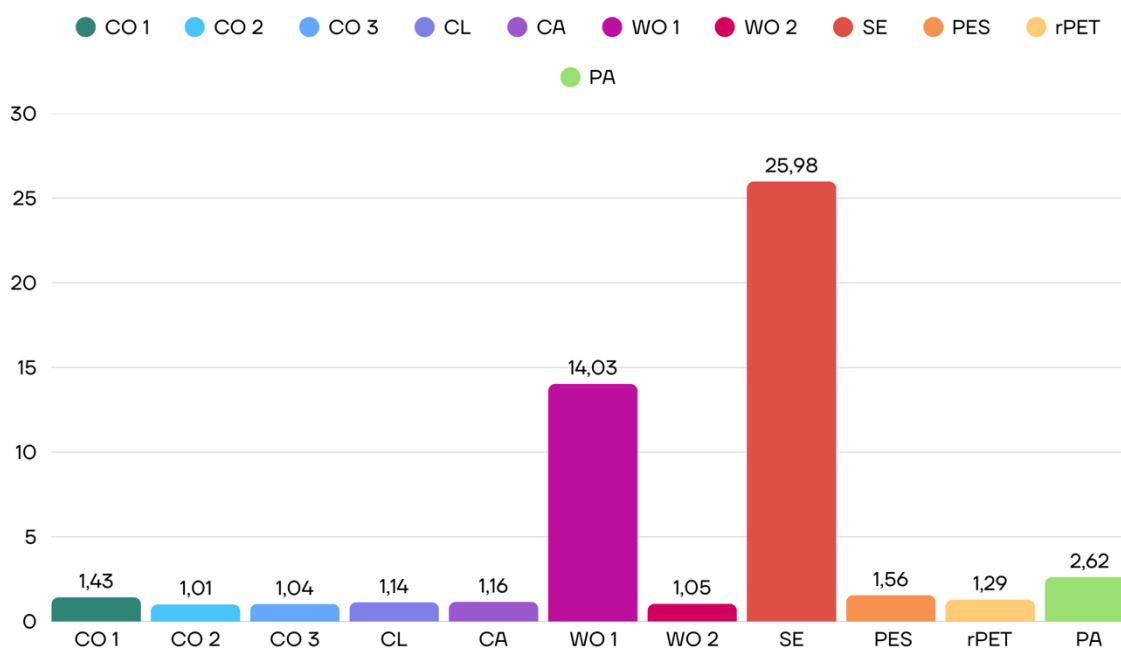
Observa-se que a etapa de aquisição do material apresenta a maior variação entre os produtos, enquanto as fases de confecção, embalagem e distribuição mantiveram valores idênticos para todos os itens. Essa uniformidade decorre da utilização do mesmo fluxo produtivo e parâmetros na configuração da calculadora, diferenciando-se apenas pelo tipo de fibra utilizada.

Na etapa de fabricação do tecido, os valores permanecem constantes entre as fibras naturais (CO 1, CO 2, CO 3, CL, CA, WO 1, WO 2 e SE), mas apresentam

aumento em relação às fibras sintéticas (PES 1, rPET e PA). Essa diferença é atribuída à etapa adicional de produção das fibras manufaturadas, ausente nos materiais têxteis naturais, os quais já se encontram disponíveis na natureza em configuração de fibras. As sintéticas, por sua vez, requerem a formação da fibra a partir da massa polimérica, antes de seguirem para a fiação (Fourné, 1999).

A última coluna, referente à distribuição apresentou emissões nulas, uma vez que todas as etapas e fornecedores foram considerados na mesma localização geográfica. Embora esse cenário não reflita a realidade da cadeia têxtil global, o objetivo metodológico foi isolar o impacto específico das diferentes fibras, que foi apresentada na coluna de aquisição do material, da Tabela 1. Na Figura 12 representa-se os dados de emissão total por camiseta.

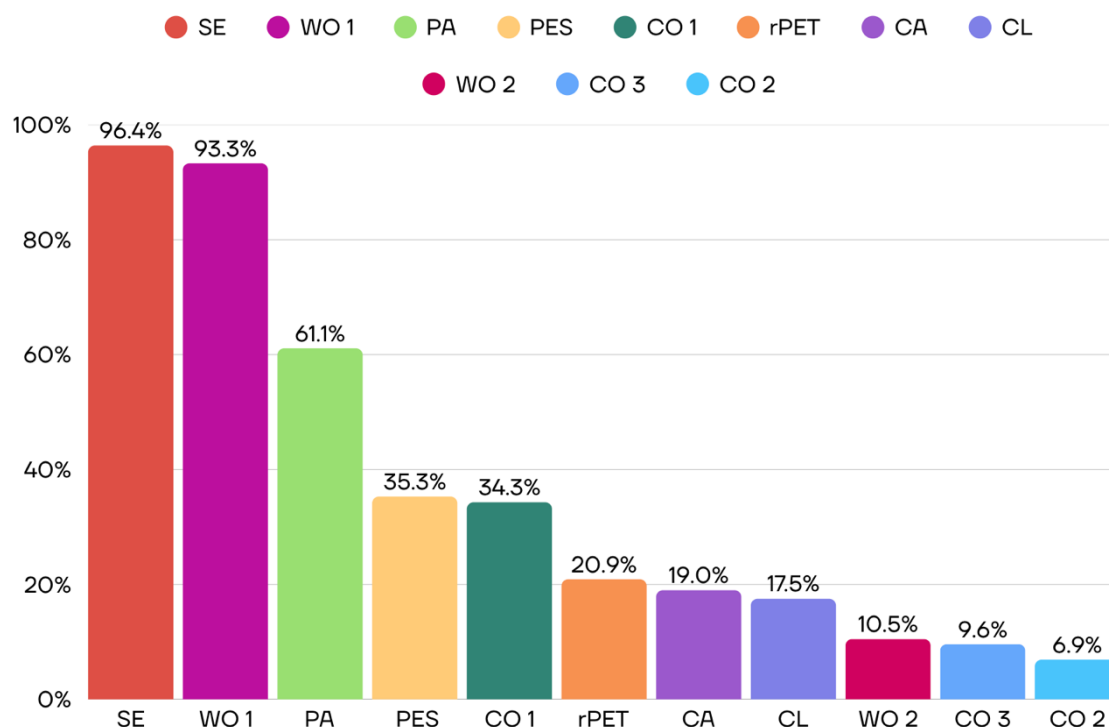
Figura 12 – Emissão total para 100 g de camiseta (kg CO₂e) utilizando a ferramenta The 2030 Calculator



Fonte: A autora (2025)

Com o objetivo de avaliar a contribuição de cada fibra nas emissões totais do produto acabado, ou seja, avaliar a representatividade da emissão da escolha da fibra com base na emissão total do produto, na Figura 13 apresenta-se o cálculo percentual das emissões das onze fibras utilizadas nas suas respectivas camisetas, em ordem decrescente. Essa análise permite identificar a representatividade de cada material na composição final das emissões do produto.

Figura 13 – Percentual de diferentes fibras têxteis na produção de camisetas utilizando a ferramenta The 2030 Calculator



Fonte: A autora (2025)

É possível notar que a contribuição emissora da etapa de aquisição da matéria-prima varia amplamente entre os produtos avaliados, oscilando de 6,9 % a 96,4 % das emissões totais. Essa variação reflete diretamente a natureza e a origem das fibras têxteis, uma vez que cada tipologia apresenta fluxos próprios de produção, insumos energéticos e impactos agrícolas ou petroquímicos.

Com objetivo de parametrizar os resultados adquiridos na ferramenta The 2030 Calculator, em unidades de medidas comparáveis com a literatura, foram convertidas todas as unidades funcionais de emissões para 100g material.

As fibras de origem animal, seda (SE) e lã convencional (WO1), apresentaram as maiores emissões na etapa de aquisição da matéria-prima nas emissões totais das camisetas, com 96,4 % e 93,3 %, respectivamente, conforme apresentado na Figura 13. Esses percentuais indicam que quase a totalidade do impacto climático desses produtos está concentrada na etapa de obtenção da fibra, antes mesmo das fases industriais de fiação e confecção. Ao analisar as emissões da unidade funcional, observa-se que a seda apresentou o maior valor absoluto entre todas as fibras avaliadas, com 25,04 kg CO₂e, seguida pela lã convencional, com 13,09 kg CO₂e, conforme o Quadro 7. Esses resultados destacam o caráter intensivo em emissões

dos materiais de origem animal, superando, de forma expressiva, as demais categorias de fibras avaliadas. O desempenho dessas fibras decorre de características inerentes ao seu ciclo produtivo. No caso da lã, as emissões são fortemente influenciadas pela fase pecuária de criação de ruminantes, especialmente ovelhas e caprinos, responsável pela liberação de metano entérico e óxido de nitrogênio associados ao manejo de dejetos e solos. Esses fluxos biogênicos possuem elevado potencial de aquecimento global e respondem pela maior parcela do GWP100 dessas fibras. Já a seda apresenta emissões elevadas devido ao uso intensivo de energia térmica e elétrica nas etapas de cozimento dos casulos e bobinagem, cujos impactos aumentam em regiões com matriz energética fóssil e uso agrícola de fertilizantes no cultivo da amoreira, planta base da alimentação do bicho-da-seda. Esses resultados estão em consonância com estudos previamente publicados (Miguel Astudillo; Gunnar Thalwitz; Fritz Vollrath, 2015; Shen; Worrell; Patel, 2012; Wiedemann *et al.*, 2020), que identificam a fase pecuária como principal ponto crítico de emissões para fibras animais, além das emissões biogênicas e alta demanda energética.

Apesar de a literatura confirmar sobre as elevadas taxas de emissão de carbono da seda e lã, principalmente quando comparadas com outras fibras têxteis, nota-se que a ferramenta The 2030 Calculator, utilizada no presente trabalho, apresenta dados expressivamente mais elevados quando comparados com dados da literatura, ainda que estes também apresentem variações altamente voláteis. Os autores Miguel Astudillo; Gunnar Thalwitz; Fritz Vollrath, publicaram dados sobre a emissão de fibras de seda, e indicaram emissões de 8,09 kg CO₂e, quando convertidos para a mesma unidade funcional utilizada no presente trabalho, de 100 g de material (Miguel Astudillo; Gunnar Thalwitz; Fritz Vollrath, 2014). Sobre a lã convencional, a publicação de Nautiyal *et al.*, (2025), e Van der Werf *et al* (2011), apresentaram emissões de 0,3 a 0,5 kg CO₂e, enquanto os autores Giuseppe Picerno *et al.*, apresentam dados de 3,3 a 8,9 kg CO₂e para a mesma fibra, também convertidos para a unidade funcional padronizada.

Para fibras sintéticas de origem fóssil, observou-se que a etapa de aquisição da matéria-prima representa contribuições significativas para as emissões de carbono dos produtos acabados. Conforme apresentado na Figura 13, a poliamida corresponde a 61,10 % e o poliéster por 35,30 % das emissões totais associadas às respectivas camisetas. Os dados obtidos pelo The 2030 Calculator indicaram

emissões de 1,60 kg CO₂e para a poliamida e 0,55 kg CO₂e para o poliéster, conforme Quadro 7. Na literatura, foram encontrados dados de emissões que variam entre 0,3 e 0,87 kg CO₂e para o poliéster e cerca de 0,27 kg CO₂e para a poliamida (Aravin Prince Periyasamy; Jiri Militky, 2020; Van Der Velden; Patel; Vogtländer, 2014; Van der Werf *et al.*, 2011), todos convertidos para mesma unidade funcional. O comportamento mais emissor da poliamida está relacionado à sua síntese mais complexa, que requer maior consumo de energia térmica e elétrica, além da produção de intermediários químicos de elevada intensidade de carbono, como a caprolactama e a adiponitrila. O poliéster, por sua vez, apresenta menor emissão em razão de seu processo mais eficiente do ponto de vista energético e da ampla escala industrial global, que favorece ganhos de rendimento e otimização de recursos (Shen; Worrell; Patel, 2012; Textile Exchange, 2021b).

O algodão convencional representa 34,3 % das emissões na etapa de aquisição da matéria-prima das camisetas, conforme a Figura 13. Esse percentual reflete um equilíbrio entre as emissões provenientes das etapas agrícolas e industriais petroquímicas, já que o cultivo do algodão é responsável por parcela significativa do impacto. Devido ao uso de fertilizantes nitrogenados, irrigação intensiva e emissões de óxido nitroso, gás com elevado potencial de aquecimento global. Segundo a ferramenta The 2030 Calculator, a emissão foi estimada em 0,49 kg CO₂e, valor que coloca o algodão na quinta posição entre as fibras analisadas. Esse desempenho é consistente com o fato de o algodão exigir insumos agrícolas. Estudos de referência corroboram esses resultados, apresentando valores inferiores, que variam entre 0,18 e 0,36 kg CO₂e (Rana *et al.*, 2015b; Van Der Velden; Patel; Vogtländer, 2014; Van der Werf *et al.*, 2011). Segundo Fonseca *et al.*, (2023) o desempenho climático do algodão convencional é fortemente condicionado por fatores de manejo agrícola, tipo de solo e origem geográfica do cultivo, o que explica parte da variação entre os dados obtidos na ferramenta e os encontrados em outros estudos.

O poliéster reciclado apresentou representatividade de 20,9 % nas emissões totais associadas à produção das camisetas. Segundo a ferramenta utilizada, a reciclagem do poliéster foi considerada por método químico para os cálculos, e a emissão do rPET representou 0,27 kg CO₂e, ocupando a sexta posição na análise comparativa entre fibras. Esse valor representa menos da metade das emissões do poliéster convencional, confirmando o potencial de mitigação do uso de materiais reciclados. Segundo a literatura, o indicador GWP100 do poliéster reciclado pode

variar amplamente conforme o método de reciclagem, mecânica ou química, com valores que podem variar entre 0,096 e 0,38 kg CO₂e (Aravin Prince Periyasamy; Jiri Militky, 2020). Essa variabilidade está relacionada principalmente às diferenças de eficiência energética e pureza do material reciclado.

As outras fibras de origem vegetal presentes na análise comparativa, cânhamo e linho, apresentaram valores de representatividade de 19,0 % e 17,5 %, respectivamente, em relação à emissão total das camisetas. As emissões estimadas pelo The 2030 Calculator foram de 0,22 kg CO₂e para o cânhamo e 0,20 kg CO₂e para o linho, valores que posicionam essas fibras em sétimo e oitavo lugar entre as avaliadas. Ambos os materiais se destacam pelo elevado rendimento agrícola e pela necessidade reduzida de energia durante a colheita, o que explica suas emissões inferiores em comparação com outras fibras naturais convencionais, como o algodão. Estudos da literatura indicam que a emissão do cânhamo pode variar entre 0,036 e 0,042 kg CO₂e (Van der Werf *et al.*, 2011), dependendo do comprimento da fibra e qualidade da matéria-prima, enquanto o relatório técnico da European Confederation of Flax and Hemp, aponta emissões de 0,0647 kg CO₂e para o linho.

As menores contribuições na etapa de aquisição de matéria-prima foram observadas nas fibras de lã reciclada, algodão orgânico e algodão reciclado, que apresentaram 10,5 %, 9,6 % e 6,9 % de representatividade, respectivamente, indicando que as alternativas recicladas e orgânicas possuem menor participação nas emissões totais das camisetas quando comparadas às fibras virgens. As emissões estimadas pelo The 2030 Calculator foram de 0,11 kg CO₂e para a lã reciclada, 0,10 kg CO₂e para o algodão orgânico e 0,07 kg CO₂e para o algodão reciclado, configurando-se como as menores emissões entre todas as fibras avaliadas. A diferença entre esses resultados e os de suas versões convencionais está diretamente associada à eliminação de etapas de alto impacto, como o cultivo agrícola e a criação de animais, além da economia de energia e água proporcionada pelo reaproveitamento de materiais. Na literatura, foram encontradas emissões similares para fibras de lã reciclada, com aproximadamente 0,07 kg CO₂e (Giuseppe Picerno *et al.*, 2022; Wiedemann *et al.*, 2020). Para fibras de algodão orgânico, as informações também se alinharam com os dados fornecidas pela calculadora, indicando potenciais emissões de 0,098 a 0,230 kg CO₂e (La Rosa; Grammatikos, 2019; Senn, 2022). Para

fibras de algodão reciclado, um estudo apontou emissão de 0,021 kg CO₂e/kg (Esteve-Turrillas; De La Guardia, 2017).

Ao analisar os dados obtidos com a ferramenta The 2030 Calculator em comparação com as referências da literatura, nota-se variabilidade nos resultados, não apenas comparando os dados encontrados pela calculadora utilizada no presente estudo, mas também avaliando a diferença de resultados em diferentes fontes de pesquisas acadêmicas, que utilizaram, por sua vez, diferentes *softwares*. Todos os dados da literatura apresentados nesta seção, seguiram as mesmas definições adotadas neste trabalho, sendo elas: *cradle-to-gate*, metodologia ACV orientada por normas ISO, indicador GWP100 para quantificar as emissões e configuração de material têxtil. A unidade funcional desses dados mencionados também foi parametrizada para 100 g, a fim de tornar os resultados comparáveis entre si, tanto na ferramenta, quanto na literatura. Diversas publicações prévias, apresentadas no estado da arte do presente estudo, mencionaram diferenças relevantes em relação ao detalhamento e espaços de *inputs* nas diferentes calculadoras, o que trouxe grande oscilação na obtenção dos resultados de estudos anteriores. A literatura menciona com frequência que existe uma relação direta entre a variação na quantidade e tipos de dados dos *inputs* das ferramentas e as emissões resultantes dos produtos avaliados, indicando que, quanto maior o detalhamento de variáveis do processo, como localização geográfica, tipo de fonte de energia consumida para produção, origem do material, etapas químicas, físicas e térmicas envolvidas, maior será a emissão resultante do produto avaliado, uma vez que os resultados se tornam mais detalhados, com menor taxa de arredondamento para os resultados. A fonte de energia elétrica e térmica considerada nos cálculos de emissão de CO₂e, bem como as variações das condições agronômicas, fertilizantes utilizados, eficiência de processos, contabilização no sequestro de carbono do cultivo de insumos vegetais, pureza dos resíduos, métodos de processamento de materiais, inclusão ou exclusão de fluxos biogênicos de metano e óxidos de nitrogênio, práticas de manejo pecuário, tratamento de dejetos, fertilização do solo, base de dados, especificidade de dados de entrada nas ferramentas, método geral e de arredondamento, são alguns dos motivos que podem influenciar diretamente na oscilação dos dados obtidos, tanto do The 2030 Calculator em comparação com a literatura, mas também analisando a variação observada entre diferentes estudos revisados para o presente trabalho.

Em muitos casos, foi observado que a ferramenta utilizada apresentou emissões mais elevadas quando comparados com os da literatura, podendo ser explicado pelo tipo de metodologia utilizada na plataforma, apresentada no Anexo 1, e pela abordagem considerada conservadora, o que significa que, sempre que possível, a ferramenta opta por conjuntos com valores mais elevados, a fim de evitar a subestimação dos impactos ambientais (Omnical Solutions, 2024a).

Com objetivo de avaliar as variações encontradas entre a ferramenta utilizada e a literatura, confeccionou-se a Tabela 2.

Tabela 2 – Comparação entre a emissão de fibras têxteis (kg CO₂e/100 g) obtidas na ferramenta The 2030 Calculator e a variação verificada na literatura

Fibra têxtil	Emissão (kg CO ₂ e) The 2030 Calculator	Emissão (kg CO ₂ e) da literatura	Δ encontrado (The 2030 Calculatos vs Literatura)
CO 1	0,49	0,18 – 0,36	- 63 % a – 27 %
CO 2	0,07	0,021	- 69 %
CO 3	0,10	0,098 – 0,23	- 2 % a + 130 %
CL	0,20	0,06	- 68 %
CA	0,22	0,036 – 0,042	- 84 % a – 81 %
WO 1	13,09	0,3 – 8,9	- 98 % a - 32 %
WO 2	0,11	0,07	- 36 %
SE	25,04	8,09	- 68 %
PES	0,55	0,3 – 0,87	- 45 % a + 59 %
rPET	0,27	0,09 – 0,3	- 64 % a + 14 %
PA	1,60	0,27	- 83 %

Fonte: A autora (2025)

4.2 ANÁLISE DE VARIAÇÃO DE EMISSÕES ATRAVÉS DA SUBSTITUIÇÃO DE FIBRAS TÊXTEIS

Esta seção será dedicada para apresentar uma avaliação das possíveis reduções percentuais de emissões de carbono que podem ser alcançadas por meio da substituição de diferentes fibras têxteis, isoladamente. Os cálculos baseiam-se nos *outputs* fornecidos pelo *software* The 2030 Calculator, realizados a partir dos dados apresentados nas colunas “aquisição do material” da Tabela 1.

A primeira análise foi realizada com base em três diferentes tipos de algodão, sendo estes, convencional, reciclado e orgânico, representados na Tabela 3 como CO 1, CO 2 e CO 3, respectivamente, sendo o primeiro, o padrão de base comparativa.

Tabela 3 – Análise comparativa para diferentes tipos de algodão

Fibra têxtil	Aquisição do material (kg CO ₂ e)	Variações (%)
CO 1	0,49	Padrão
CO 2	0,07	- 85,70
CO 3	0,10	- 79,60

Fonte: A autora (2025)

Com base nos valores apresentados na coluna de aquisição do material, observa-se que as versões reciclada e orgânica proporcionaram reduções de 85,70 % e 79,60 %, respectivamente, em comparação ao algodão convencional, quando substituídos. Na literatura, o estudo de Abagnato (2019) apresentou uma análise comparativa entre o algodão virgem e o algodão reciclado, considerando diferentes produtos e unidades funcionais. Para fios têxteis compostos por 100 % de algodão, foi observada uma redução de 60,20 % nas emissões de CO₂e, quando substituído o algodão virgem pelo reciclado. Em tecidos planos de mesma composição, a diminuição registrada foi de 50 %. A maior diferença foi identificada na categoria de camisetas, também 100 % algodão, cuja substituição resultou em uma redução de 98,7 % das emissões (Samuele Abagnato; Lucia Rigamonti; Mario Grosso, 2019). Para a substituição do algodão convencional pelo orgânico, a literatura apresenta variação que pode chegar a 28 % de aumento, ou alcançar 73 % de redução nas emissões de carbono (La Rosa; Grammatikos, 2019; Senn, 2022; Van Der Velden; Patel; Vogtländer, 2014; Van der Werf *et al.*, 2011).

Da mesma forma, o algodão convencional manteve-se usado como padrão para análise comparativa com outras duas fibras têxteis naturais vegetais, sendo elas linho e cânhamo. As variações percentuais obtidas demonstram reduções de 59,18 % para o linho e 55,10 % para o cânhamo, conforme a Tabela 4.

Tabela 4 – Análise comparativa para diferentes fibras naturais vegetais

Fibra têxtil	Aquisição do material (kg CO ₂ e)	Variações (%)
CO 1	0,49	Padrão
CL	0,20	- 59,18
CA	0,22	- 55,10

Fonte: A autora (2025)

Com base nos dados da literatura, a substituição do algodão convencional para o linho pode representar redução de 64,0 % a 82,2 % nas emissões de CO₂e, enquanto para o cânhamo, as reduções podem variar de 77,0 % a 90,0 % (European Confederation of Flax and Hemp, 2022; Van der Werf *et al.*, 2011).

Na possível substituição entre fibras naturais animais de diferentes tipos, sendo elas lã convencional e lã reciclada, obteve-se redução de 99,16 %, conforme apresentado na Tabela 5.

Tabela 5 – Análise comparativa para diferentes tipos de lã

Fibra têxtil	Aquisição do material (kg CO ₂ e)	Variações (%)
WO 1	13,09	Padrão
WO 2	0,11	- 99,16

Fonte: A autora (2025)

Na literatura, os autores Abagnato *et al.*, 2019 apresentam dados sobre a substituição de fibras de lã convencional pela reciclada e indicaram redução de 99,2 % nas emissões de CO₂e, dado equivalente ao obtido na ferramenta do presente estudo (Samuele Abagnato; Lucia Rigamonti; Mario Grosso, 2019).

Para fibras têxteis sintéticas, a análise de substituição para poliéster convencional, poliéster reciclado e poliamida foi realizada, sendo o primeiro definido como padrão para ambos os casos. Na Tabela 6 demonstra-se a redução obtida com a substituição da fibra virgem pelo poliéster reciclado, e em seguida, com a poliamida, representando diminuição de 50,9 % e aumento de 190,9 %, respectivamente, nas emissões.

Tabela 6 – Análise comparativa para diferentes tipos de fibras sintéticas

Fibra têxtil	Aquisição do material (kg CO ₂ e)	Variações (%)
PES	0,55	Padrão
rPET	0,27	- 50,9 %
PA	1,60	+ 190,9 %

Fonte: A autora (2025)

Em dados de estudos previamente publicados, a substituição do poliéster virgem pelo reciclado tem potencial de aumentar em até 2,70 % e reduzir em até 89,00 % as emissões de carbono, conforme o método de reciclagem empregada. Para o cenário em que a poliamida é usada para substituir o poliéster convencional, verifica-

se redução de 10,00 % a 69,10 % (Aravin Prince Periyasamy; Jiri Militky, 2020; Van Der Velden; Patel; Vogtländer, 2014).

Ao comparar poliéster e lã, ambos convencionais, obteve-se um aumento de 2280 %, sendo o primeiro como padrão, conforme apresentada na Tabela 7.

Tabela 7 – Análise comparativa entre poliéster e lã convencionais

Fibra têxtil	Aquisição do material (kg CO ₂ e)	Variações (%)
PES	0,55	Padrão
WO 1	13,09	+ 2280 %

Fonte: A autora (2025)

Os dados da literatura estimam que a substituição do poliéster pela lã, ambos convencionais, podem apresentar variação nula e chegar a um aumento de até 918 % (Bianco; Picerno; Blengini, 2023; Nautiyal *et al.*, 2025; Van Der Velden; Patel; Vogtländer, 2014).

Segundo os dados do The 2030 Calculator, a poliamida, quando comparada com a seda, demonstrou um aumento de 1465 %, sendo a primeira definida como padrão, conforme apresentado na Tabela 8.

Tabela 8 – Análise comparativa entre a seda e poliamida 6

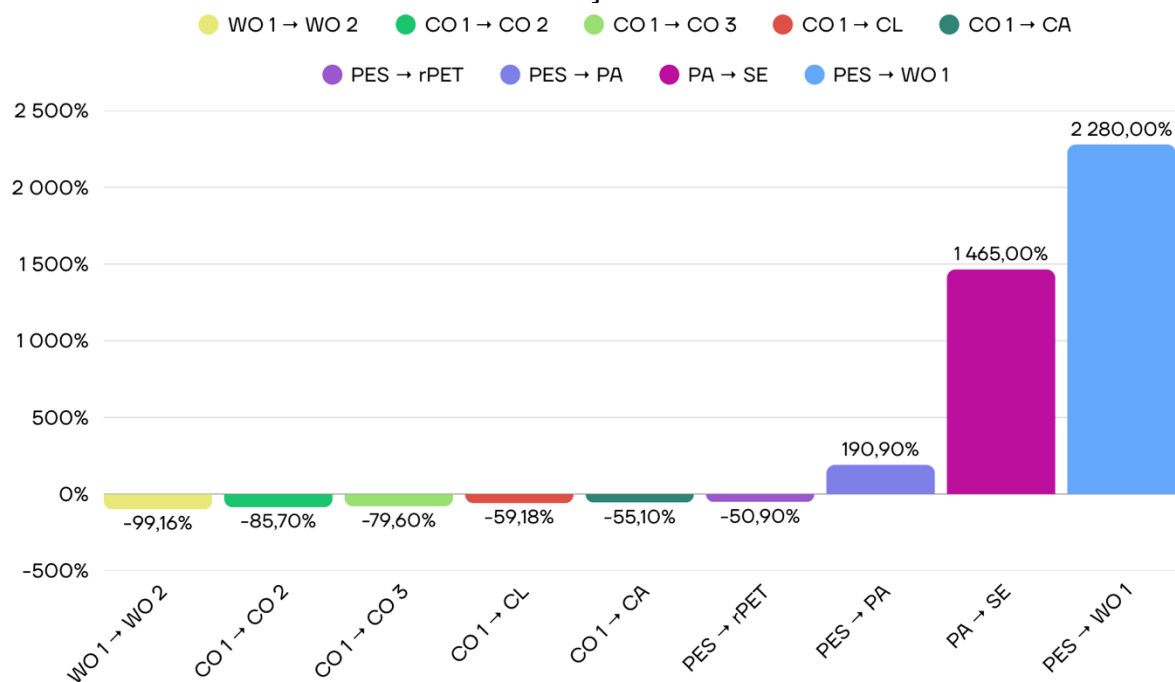
Nome do produto	Aquisição do material (kg CO ₂ e)	Variações (%)
PA	1,60	Padrão
SE	25,04	+ 1465 %

Fonte: A autora (2025)

Estudos estimam que a substituição entre poliamida e seda pode chegar a um aumento de até 2896 % (Miguel Astudillo; Gunnar Thalwitz; Fritz Vollrath, 2014; Van Der Velden; Patel; Vogtländer, 2014).

Com base nos dados apresentados, na Figura 14 representa-se as variações em emissões das substituições de fibras na etapa de aquisição de material.

Figura 14 – Variação percentual das emissões na etapa de aquisição do material através de substituição de fibras têxteis



Fonte: A autora (2025)

Com base nas variações calculadas, tanto pela ferramenta quanto pela literatura, na Tabela 9 compila-se todos os valores apresentados na presente seção.

Tabela 9 – Variação percentual das emissões na etapa de aquisição do material através de substituição de fibras têxteis

Substituição	Cálculos realizados com The 2030 Calculator	Variação encontrada da literatura	Média da variação da literatura
CO 1 → CO 2	- 85,70 %	- 98,7 % a - 50 %	- 74,3 %
CO 1 → CO 3	- 79,60 %	- 73 % a + 28 %	- 22,5 %
CO 1 → CL	- 59,18 %	- 82% a - 64%	- 73 %
CO 1 → CA	- 55,10 %	- 90% a - 77%	- 83,5 %
WO 1 → WO 2	- 99,16 %	- 99,2 %	- 99,2 %
PES → rPET	- 50,9 %	- 89 % a + 2,7 %	- 43,1 %
PES → PA	+ 190,9 %	- 69,1 % a - 10 %	- 39,5 %
PES → WO 1	+ 2.280 %	0 % a + 918 %	+ 459 %
PA → SE	+ 1.465 %	+ 2.896 %	+ 2896 %

Fonte: A autora (2025)

Dessa forma, é possível observar que, conforme a substituição de fibras propostas, encontram-se variações positivas e negativas, sendo necessário avaliar

caso a caso, para obter-se uma conclusão de quais são as opções com maiores vantagens ambientais para o produto acabado em questão.

4.3 PROPOSTAS DE SUBSTITUIÇÃO DE FIBRAS NO DESENVOLVIMENTO DE PRODUTO TÊXTIL E CONTRIBUIÇÕES PARA AS METAS GLOBAIS

Esta seção tem como objetivo apresentar propostas de substituição de fibras têxteis no desenvolvimento de produtos, considerando suas emissões de carbono com base no indicador GWP100. As análises levam em conta não apenas a origem e a classificação das fibras, mas também suas características técnicas e comerciais, bem como o potencial de aplicação em tecidos destinados à indústria têxtil e de moda. Primeiramente, são apresentadas as propostas fundamentadas nos resultados obtidos na etapa de aquisição dos materiais. Em seguida, são expostas as reduções de emissões observadas nas camisetas, com o intuito de identificar quais substituições de fibras efetivamente contribuem para a diminuição das emissões totais do produto acabado. Por fim, discute-se a contribuição potencial de cada substituição para o cumprimento das diretrizes dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável e o alinhamento com as metas climáticas estabelecidas pelo Acordo de Paris.

4.3.1 Substituição de lã convencional por lã reciclada

Considerando as nove substituições analisadas previamente, a utilização da lã reciclada em alternativa à lã convencional se mostrou como alteração de maior impacto para a mitigação das emissões de carbono, apresentando potencial de redução de aproximadamente 99,16 % no indicador GWP100. Além da expressiva melhora no desempenho ambiental avaliado, essa substituição reforça a adoção de modelos circulares na indústria têxtil, ao incorporar processos de reciclagem que possuem elevado valor ecológico por eliminar as etapas mais impactantes do ciclo de vida da lã virgem. Essa abordagem contribui significativamente para a redução do consumo de recursos naturais e para a redução do volume de resíduos destinados a aterros (Göran Sandin, 2019). Do ponto de vista técnico e de aplicabilidade, a lã reciclada mantém propriedades comparáveis às da fibra convencional, especialmente quando obtida por meio de reciclagem mecânica, preservando características como regulação térmica, conforto e versatilidade.

4.3.2 Substituição de algodão convencional por algodão reciclado e orgânico

A segunda e terceira proposta de substituição com maior relevância e potencial de redução de emissões foram relacionadas com os diferentes tipos de algodão, com proposta de substituir o algodão convencional pelo reciclado e orgânico, com diminuições de até 85,7 % e 79,6 %, respectivamente. A substituição do tipo convencional pelo reciclado está relacionado com a eliminação das etapas de cultivo, já que o processo utiliza resíduos têxteis pré e pós-consumo, eliminando o uso de água, fertilizantes, pesticidas e produtos químicos das etapas iniciais. Essa estratégia promove a circularidade, reduzindo a dependência de insumos virgens e o volume de descarte.

Apesar do elevado potencial de redução de emissões, a implementação do algodão reciclado em substituição ao convencional enfrenta desafios técnicos, logísticos e mercadológicos relevantes. Um dos principais entraves está relacionado à necessidade de educação dos consumidores quanto ao descarte adequado das peças, condição fundamental para garantir o modelo circular e qualificação de resíduos têxteis destinados à reciclagem. A eficiência dos sistemas de coleta e a estrutura logística dos centros de triagem também representam gargalos significativos, especialmente no que se refere à separação de materiais mistos, uma vez que grande parte dos produtos têxteis é composta por misturas de fibras, dificultando a reciclagem mecânica pura do algodão.

Do ponto de vista técnico, o processo mecânico de reciclagem promove a fragmentação das fibras, reduzindo seu comprimento médio, variável diretamente associada à resistência, maciez, uniformidade, brilho e desempenho mecânico do fio e do tecido resultante. Como consequência, frequentemente torna-se necessária a mistura com fibras virgens para garantir propriedades adequadas ao produto final, o que pode limitar o percentual efetivo de material reciclado incorporado. Além disso, há desafios relacionados à padronização estética e à percepção de qualidade, visto que o algodão reciclado pode apresentar variações de tonalidade e textura que impactam sua competitividade frente ao algodão virgem em determinados segmentos de mercado.

Outro fator limitante refere-se ao custo. Atualmente, produtos com conteúdo reciclado tendem a apresentar preços superiores, sobretudo em função da menor

escala produtiva, da complexidade logística e da necessidade de processos adicionais de triagem e reprocessamento. Esse diferencial de preço ainda constitui uma barreira para ampla adoção pelo consumidor final e para incorporação massiva pelas marcas, especialmente em mercados altamente sensíveis a preço. Dessa forma, embora ambientalmente promissora, a transição para o algodão reciclado exige avanços estruturais em sistemas de coleta, tecnologia de reciclagem, escala produtiva e conscientização de mercado para que seu potencial de mitigação climática seja plenamente viabilizado.

Por sua vez, a substituição do algodão convencional pelo orgânico também apresenta vantagens ambientais expressivas, especialmente por eliminar o uso de agrotóxicos, fertilizantes sintéticos e pesticidas, principais responsáveis pelos impactos de acidificação e eutrofização identificados na agricultura convencional, contribuindo para menor contaminação do solo e da água, além de preservar a saúde dos ecossistemas e dos agricultores (Esteve-Turrillas; De La Guardia, 2017). Do ponto de vista técnico e comercial, a substituição dos diferentes tipos de algodão não impacta ou limita nas características necessárias de aplicabilidade para artigos têxteis.

4.3.3 Substituição do algodão convencional por linho e cânhamo

A quarta e quinta substituição com maior relevância em redução de emissões estão relacionadas com fibras vegetais alternativas ao algodão convencional, sendo elas linho e o cânhamo, que demonstram ser estratégias promissoras para a redução das emissões de carbono, representando diminuição de 59,18 % e 55,10 %, respectivamente. O cultivo do linho requer menores insumos agrícolas e irrigação, com alta eficiência de conversão de biomassa em fibra, ou seja, alta proporção entre a quantidade total de planta produzida e a parte fibrosa utilizável para fins têxteis. O cânhamo, por sua vez, se destaca pela elevada produtividade, rápido crescimento, com ciclo aproximado de 90 dias, e necessidade mínima de água, fertilizantes e pesticidas, podendo ser cultivado sem irrigação e em rotação de culturas, o que contribui para a regeneração do solo e para a redução de impactos de acidificação e eutrofização. Ressalta-se que o linho e o cânhamo apresentam excelente desempenho técnico, com durabilidade e resistência mecânica, além toque vegetal encontrado nas fibras de algodão (La Rosa; Grammatikos, 2019).

4.3.4 Substituição de poliéster convencional por poliéster reciclado

A substituição classificada em sexto lugar refere-se à troca do poliéster virgem pelo reciclado, que apresentou redução de 50,90 % no indicador GWP100. Estudos apontam que o expressivo potencial de mitigação das emissões ao optar pelo poliéster reciclado decorre, sobretudo, da eliminação das etapas de polimerização e síntese a partir do petróleo, já que o rPET utiliza resíduos plásticos, como garrafas PET e resíduos têxteis, como matéria-prima. Essa substituição contribui diretamente para a redução da dependência de recursos fósseis e para o fortalecimento de modelos circulares no setor. Do ponto de vista técnico e comercial, o poliéster reciclado pode apresentar desempenho, aparência e propriedades físicas similares ou equivalentes ao material virgem, conforme o método e controle de qualidade do processo de reciclagem, pela sua característica termoplástica e elevado potencial de reciclabilidade. A reciclagem mecânica, embora amplamente utilizada devido ao seu menor custo e simplicidade operacional, promove degradação do polímero, resultando em redução das propriedades mecânicas e alterações de cor, o que frequentemente demanda a incorporação de frações de poliéster virgem para restabelecer o desempenho do produto final. Em contrapartida, a reciclagem química, também denominada como depolimerização, permite a quebra das cadeias poliméricas em seus monômeros originais, possibilitando a repolimerização e a obtenção de um material com características físico-químicas e qualidade equivalentes às do poliéster virgem (Aravin Prince Periyasamy; Jiri Militky, 2020). Além disso, os avanços contínuos em tecnologia e inovação têm aprimorado significativamente a qualidade e a performance dos produtos circulares, consolidando o rPET como uma alternativa ambientalmente e economicamente viável para a indústria têxtil (Textile Exchange, 2021b).

4.3.5 Substituição de poliéster por poliamida

A proposta de substituição do poliéster pela poliamida não se demonstrou vantajosa ou ambientalmente benéfica, uma vez que apresentou aumento de 190,9 % nas emissões de carbono. Do ponto de vista comercial, o poliéster destaca-se por sua versatilidade, ampla disponibilidade em escala industrial e baixo custo de produção, enquanto a poliamida é reconhecida como uma opção de valor agregado, devido ao

conforto térmico superior e toque macio, essencial para aplicações específicas (Deopura *et al.*, 2008). Para reduzir essa diferença de performance e percepção entre as duas fibras, avanços tecnológicos que ampliam a competitividade do poliéster, como modificações estruturais que aumentam o transporte de umidade e acabamentos superficiais que melhoram sua interação com a água, torna-o mais adequado para aplicações que exigem maior conforto e desempenho funcional.

4.3.6 Substituição de poliamida por seda

Na análise de substituição entre poliamida e seda, os resultados indicam que a substituição entre essas fibras implicaria um aumento expressivo nas emissões de CO₂e, com crescimento de 1465 % no indicador GWP100, não sendo, portanto, uma alternativa ambientalmente recomendada sob a perspectiva do impacto climático. Na perceptiva técnica e funcional, a poliamida apresenta amplo potencial de aplicação em substituição à seda, sendo utilizada em segmentos como vestuário casual, esportivo, *workwear*, alfaiataria e moda íntima. Suas propriedades conferem desempenho altamente competitivo, destacando-se pelo toque macio, superfície lisa, conforto térmico, bom caimento, brilho, resistência mecânica e durabilidade. Além disso, a fibra possui vantagens comerciais importantes, como menor custo de produção e maior vida útil dos produtos, o que explica sua ampla difusão na indústria têxtil e de moda (Kothari, 2008). Ainda que a seda mantenha elevado valor estético e simbólico, suas emissões consideravelmente superiores tornam essa substituição ambientalmente desfavorável.

4.3.7 Substituição de poliéster por lã

Por fim, a análise referente à substituição do poliéster pela lã, ambos convencionais, demonstra um aumento significativo nas emissões de CO₂e, com crescimento de 2280 %, não sendo, portanto, uma alternativa ambientalmente recomendada sob a perspectiva do impacto climático das fibras têxteis. Sob o ponto de vista técnico e funcional, o poliéster já desempenha amplamente o papel de substituto da lã, especialmente em artigos de inverno, como casacos, sobretudos, malhas e forros térmicos, devido à sua capacidade de proporcionar isolamento

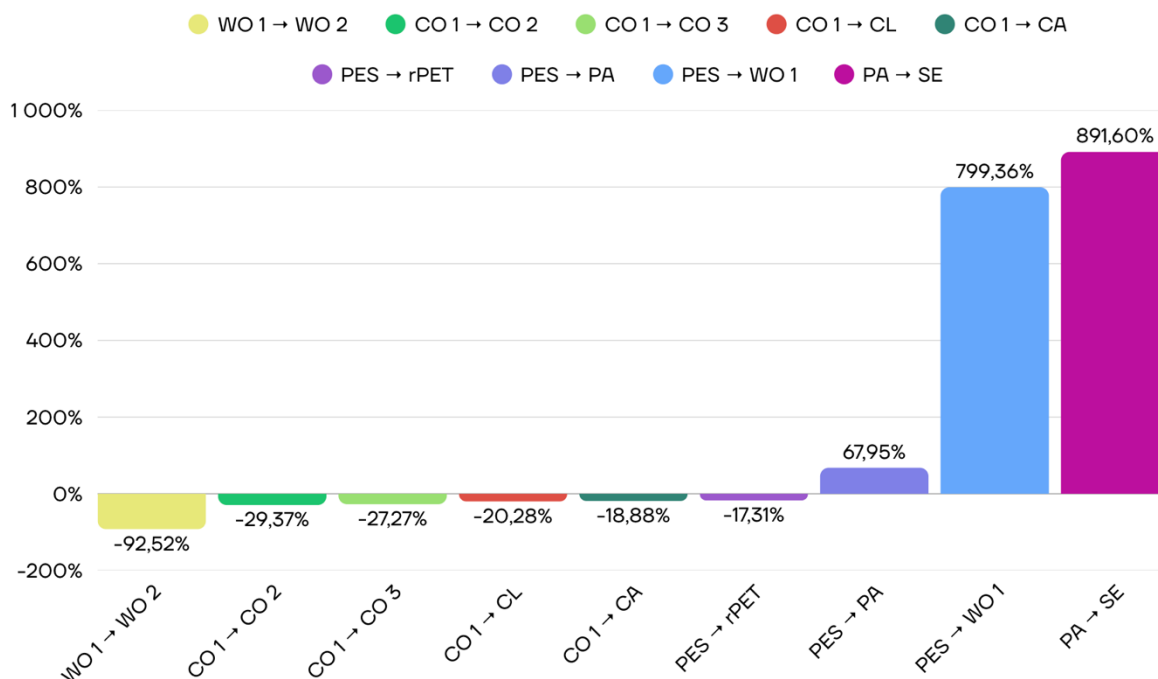
térmico, aliada a vantagens como menor custo, maior durabilidade e facilidade de manutenção. Assim, embora o poliéster também apresente desafios ambientais, principalmente por sua origem fóssil e não biodegradabilidade, ele ainda se destaca como uma opção mais favorável em termos de emissões diretas de carbono quando comparado à lã convencional.

Portanto, ao avaliarmos isoladamente as possíveis reduções nas emissões de carbono através da substituição de fibras têxteis, verifica-se que seis das nove substituições propostas demonstraram melhoras significativas nas emissões, conforme apresentado na Tabela 9.

4.3.8 Impacto das substituições de fibras nas emissões totais das camisetas

Através dos dados obtidos com a ferramenta The 2030 Calculator, tornou-se possível mensurar o impacto direto na emissão total da produção de camisetas, através da substituição de fibras têxteis presente na composição dos tecidos. A partir das respectivas variações, foi desenvolvido um ranqueamento de desempenho, com potencial de melhora no indicador GWP100 em ordem decrescente, apresentada na Figura 15.

Figura 15 – Ranqueamento de variação em emissões na produção de camisetas através da substituição de fibras têxteis



Fonte: A autora (2025)

Conforme apresentado, as substituições envolvendo materiais reciclados de lã e algodão destacaram-se como as mais eficientes na redução das emissões de carbono, ocupando o primeiro e o segundo lugar no ranqueamento, respectivamente. Em seguida, as substituições do algodão convencional por algodão orgânico, linho e cânhamo também demonstraram resultados positivos, com reduções de 27,27 %, 20,28 % e 18,88 %, respectivamente, nas emissões em relação às fibras de referência. A troca do poliéster virgem por poliéster reciclado apresentou redução de 17,31 %, reforçando o potencial de redução associado ao uso de materiais reciclados. Em contrapartida, as substituições do poliéster por poliamida, do poliéster por lã e poliamida por seda mostraram-se desfavoráveis aos objetivos de descarbonização, resultando em aumentos de 67,95 %, 799,36 % e 891,60 % no indicador GWP100 para a produção de camisetas, respectivamente. Esses resultados evidenciam que nem todas as substituições de fibras resultam em benefícios ambientais e que a análise quantitativa das emissões é essencial para orientar escolhas de materiais mais alinhadas às metas globais de redução de carbono.

Entretanto, a substituição por fibras ambientalmente mais vantajosas não pode ser compreendida como uma estratégia isolada, restrita à troca de matéria-

prima. Para que sua implementação seja efetiva, é necessário que esteja associada a estratégias integradas de desenvolvimento de produto e de produção circular. Conforme discutido anteriormente, materiais reciclados, embora apresentem elevado potencial de mitigação de emissões, carregam desafios técnicos, estéticos e estruturais que precisam ser considerados na fase de concepção do produto. O algodão reciclado, por exemplo, tende a apresentar fibras de menor comprimento em decorrência do processo mecânico de desfibramento, o que pode resultar em tecidos mais rígidos, estruturados e com textura mais áspera quando comparados ao algodão virgem.

Nesse contexto, torna-se fundamental alinhar as características intrínsecas do material às exigências funcionais e estéticas do produto final. Um tecido de algodão reciclado com maior rigidez pode ser estrategicamente aplicado em produtos que demandem estrutura, como peças utilitárias, modelagens amplas ou artigos de decoração, de modo que a estética e o desempenho estejam coerentes com suas propriedades físicas. Um dos equívocos recorrentes na transição para materiais reciclados consiste em tentar reproduzir exatamente o desempenho e a aparência de um produto originalmente desenvolvido com fibra virgem, desconsiderando que se tratam de materiais com comportamentos distintos. Essa incompatibilidade pode comprometer a percepção de qualidade e a aceitação de mercado.

Além do vestuário, a aplicação de tecidos reciclados pode ser expandida para categorias que demandam menor padronização estética ou elevada uniformidade superficial, como almofadas, estofados, artigos decorativos, brinquedos ou acessórios para animais, ampliando o potencial de absorção desses materiais no mercado e favorecendo a viabilidade econômica da cadeia circular.

Outro desafio estrutural refere-se à triagem e coleta de produtos pós-consumo destinados à reciclagem. Atualmente, em muitos contextos, a circularidade ainda é pensada de forma reativa, ou seja, o produto é desenvolvido com base em um modelo linear e, posteriormente, buscam-se soluções para mitigar o problema do descarte. A abordagem de *ecodesign* propõe uma inversão dessa lógica, incorporando desde a fase de concepção aspectos, como capacidade e facilidade de desmontagem, redução na mistura de materiais têxteis na composição dos tecidos, estratégias de separação de fibras e componentes, rotulagem adequada e definição de fluxos de retorno. Ao prever como o consumidor irá descartar o produto, onde esse descarte ocorrerá e como o material será reinserido no sistema produtivo, o ciclo passa a ser

concebido antes mesmo da fabricação, aumentando significativamente a probabilidade de fechamento efetivo dos ciclos produtos fechados. Assim, a circularidade deixa de ser um ajuste posterior e passa a integrar estruturalmente o desenvolvimento do produto.

Cabe ressaltar que o presente estudo adotou o indicador GWP100 como métrica principal de avaliação, por ser o parâmetro mais consolidado para mensuração das emissões de gases de efeito estufa e potencial de aquecimento global. Contudo, a sustentabilidade de materiais têxteis não pode ser compreendida exclusivamente sob a ótica climática. Outros indicadores ambientais relevantes, como consumo de água, toxicidade humana e ecotóxica, demanda energética cumulativa, acidificação, eutrofização, uso da terra e formação de material particulado, podem alterar substancialmente a hierarquização de alternativas materiais quando avaliados em conjunto (KLOPFER; CURRAN, 2015).

A incorporação de múltiplas categorias de impacto permite uma leitura mais sistêmica dos efeitos ambientais, evitando a transferência de impacto entre categorias. Por exemplo, uma fibra com menor GWP100 pode apresentar maior consumo hídrico ou maior potencial de eutrofização, dependendo das condições de cultivo ou processamento. Da mesma forma, análises relacionadas à biodegradabilidade envolvem múltiplas dimensões ambientais, incluindo emissões atmosféricas, contaminação do solo e da água e dinâmica de degradação em diferentes ambientes. Assim, a ampliação do escopo para além do GWP100 poderia modificar o cenário comparativo apresentado neste trabalho, reforçando a importância de avaliações multicritério para decisões estratégicas de materiais.

Com base nas metas indicadas pelo Acordo de Paris e publicações oficiais governamentais (UNFCCC, 2023) que preveem a mitigação das emissões de carbono, expressas pelo indicador GWP100, com reduções de 43 % até 2030 e de, no mínimo, 99 % até 2050, observa-se que apenas a substituição da lã convencional pela lã reciclada apresentou alinhamento parcial com os objetivos globais de descarbonização. Essa substituição resultou em uma redução potencial de 92,52 % nas emissões associadas ao produto acabado, representando contribuição significativa para a mitigação do impacto climático. Ainda assim, o percentual alcançado atende às metas projetadas para 2030, mas permanece abaixo do nível de redução exigido para 2050, quando se prevê a neutralidade de carbono com reduções mínimas de 99 %. Todas as outras substituições propostas para as camisetas

apresentaram diminuições insuficientes, abaixo da primeira meta global, projetada para 2030.

Assim, a mitigação efetiva das emissões demanda a adoção de estratégias complementares, como o uso de energia renovável, a melhoria da eficiência energética e o fortalecimento da produção e consumo locais, reduzindo impactos associados ao transporte e à logística. Além disso, o avanço de modelos circulares deve ser priorizado, considerando avaliações em fronteiras de sistema mais amplas, como *cradle-to-grave* e *cradle-to-cradle*, que permitam capturar de forma mais realista os impactos ao longo de todo o ciclo de vida dos produtos. No âmbito dos ODS 12 e 13, a adoção de fibras de menor impacto contribui com as diretrizes de consumo e produção responsáveis e para a ação climática. Entre essas estratégias, destaca-se a ampliação do uso de fibras recicladas e o reaproveitamento de resíduos pré e pós-consumo reduzem a pressão sobre recursos naturais, diminuem as emissões ligadas à extração e processamento de matérias-primas virgens e promovem o fechamento dos ciclos produtivos. Nesse sentido, as avaliações comparativas de impacto realizadas neste estudo oferecem subsídios técnicos ao *ecodesign*, permitindo que as decisões de desenvolvimento de produto incorporem, desde a concepção, a performance ambiental dos materiais e as metas globais de descarbonização.

5 CONCLUSÃO

As substituições de fibras têxteis influenciam significativamente as emissões de carbono, destacando a seleção de materiais como fator crucial. Na avaliação isolada das possíveis substituições de fibras, as opções recicladas, especialmente lã e algodão, apresentaram as maiores reduções, reforçando a importância da circularidade na descarbonização do setor. Também se destacaram as reduções alcançadas nas trocas do algodão convencional por algodão orgânico, linho e cânhamo, assim como na substituição do poliéster virgem por poliéster reciclado. Em contrapartida, substituições como poliéster por poliamida, poliéster por lã e poliamida por seda demonstraram aumentos expressivos nas emissões, confirmando que nem todas as mudanças de fibra resultam em benefícios ambientais diretos e que a avaliação quantitativa é indispensável para fundamentar decisões de projeto e desenvolvimento de produto.

Com base nas metas estabelecidas pelo Acordo de Paris e publicações oficiais (UNFCCC, 2023) que preveem reduções de 43 % nas emissões até 2030 e 99 % até 2050, conclui-se que as substituições isoladas de fibras têxteis, ainda que relevantes, não são suficientes para atender plenamente aos níveis de mitigação exigidos. Na análise de substituição de fibras e seus respectivos impacto nos produtos acabados, ou seja, nas camisetas, somente a substituição da lã convencional pela lã reciclada demonstrou compatibilidade parcial com as metas globais de descarbonização. Essa troca proporcionou uma redução potencial de 92,52 % nas emissões do produto final, apesar disso, o percentual obtido corresponde às metas estabelecidas para 2030, mas ainda se mantém aquém do patamar de redução necessário para 2050, quando se projeta alcançar a neutralidade de carbono com diminuições mínimas de 99 %. Dessa forma, torna-se necessária a integração de estratégias complementares, como o uso de energia renovável, otimização de processos produtivos e modelos circulares.

Em consonância com os ODS 12 e 13, o estudo evidencia que o uso de fibras de menor impacto aliado ao *ecodesign* é essencial para a transição do setor têxtil à neutralidade de carbono, além importância da padronização metodológica que fornece subsídios técnicos para decisões empresariais mais sustentáveis.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADHIKARI, Nishan; LI, Hailin; GOPALAKRISHNAN, Bhaskaran. A bibliometric and systematic review of carbon footprint tracking in cross-sector industries: emerging tools and technologies. Sustainability (Switzerland). Basel: MDPI, 1 maio 2025.

ARAVIN PRINCE PERIYASAMY; MILITKY, Jiri. Environmental footprints of recycled polyester. Singapore: Springer, 2020. Textile Science and Clothing Technology.

ASTUDILLO, M. F.; THALWITZ, G.; VOLLRATH, F. Life cycle assessment of silk production—a case study from India. In: MUTHU, S. S. Handbook of Life Cycle Assessment (LCA) of Textiles and Clothing. Oxford: Elsevier, 2015. p. 255–274.

ASTUDILLO, Miguel F.; THALWITZ, Gunnar; VOLLRATH, Fritz. Life cycle assessment of Indian silk. Journal of Cleaner Production, v. 81, p. 158–167, 15 out. 2014.

BIANCO, Isabella et al. Environmental impacts in the textile sector: a life cycle assessment case study of a woollen undershirt. Sustainability (Switzerland), v. 15, n. 15, 1 ago. 2023.

BIANCO, Isabella; PICERNO, Giuseppe; BLENGINI, Gian Andrea. Life cycle assessment (LCA) of worsted and woollen processing in wool production: ReviWool® noils and other wool co-products. Journal of Cleaner Production, v. 415, 20 ago. 2023.

BILGEN, S. Structure and environmental impact of global energy consumption. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 38, p. 890–902, 1 out. 2014.

CAI, Ya Jun; CHOI, Tsan Ming. A United Nations' Sustainable Development Goals perspective for sustainable textile and apparel supply chain management. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, v. 141, 1 set. 2020.

CALVIN, Katherine et al. Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva: IPCC, 2023. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/>. Acesso em: 12 nov. 2025.

CIROTH, Andreas; ARVIDSSON, Rickard (eds.). **Life Cycle Inventory Analysis: Methods and Data**. Cham: Springer Nature Switzerland AG, 2021. (LCA Compendium – The Complete World of Life Cycle Assessment). DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-62270-1>.

CLIMATE ACTION TRACKER. Brazil: Targets. Climate Action Tracker, 5 dez. 2023. Disponível em: <https://climateactiontracker.org/countries/brazil/2023-12-05/targets/>. Acesso em: 12 nov. 2025.

COOK, J. G. Handbook of textile fibres: natural fibres. Cambridge: Woodhead Publishing, 2001.

COTTON INCORPORATED. Life Cycle Assessment of Cotton Fiber & Fabric – Full Report. Cary, NC: Cotton Incorporated.

DAHMANI, Noureddine et al. Smart circular product design strategies towards eco-effective production systems: a lean eco-design industry 4.0 framework. Journal of Cleaner Production, v. 320, 20 out. 2021.

DEOPURA, B. L. et al. Polyesters and polyamides. Cambridge: Woodhead Publishing, 2008. Disponível em: <https://www.woodheadpublishing.com>.

DIFFENBAUGH, Noah S.; BURKE, Marshall. Global warming has increased global economic inequality. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, v. 116, n. 20, p. 9808–9813, 14 maio 2019.

ESTEVE-TURRILLAS, F. A.; DE LA GUARDIA, M. Environmental impact of Recover cotton in textile industry. Resources, Conservation and Recycling, v. 116, p. 107–115, 1 jan. 2017.

EUROPEAN CONFEDERATION OF FLAX AND HEMP. LCA report of European Flax® fibre. Brussels: European Confederation of Flax and Hemp, 2022.

FONSECA, Ana et al. Systematic insights into a textile industry: reviewing life cycle assessment and eco-design. Sustainability (Switzerland). Basel: MDPI, 1 nov. 2023.

FOURNÉ, Franz. Synthetic fibers: machines and equipment, manufacture, properties: handbook for plant engineering, machine design, and operation. Munich: Hanser; Cincinnati: Hanser/Gardner Publications, 1999.

GABRIEL, Marisa; LUQUE, María Lourdes Delgado. Sustainable Development Goal 12 and its relationship with the textile industry. In: Sustainable Development Goals in Practice. 2006.

GÁLVEZ-SÁNCHEZ, Francisco Jesús et al. Adoption of sustainability principles in the fashion industry: a systematic literature review. Journal of the Knowledge Economy, p. 1–54, 20 dez. 2024.

BIANCO, Isabella; PICERNO, Giuseppe; BLENGINI, Gian Andrea; GERBONI, Raffaella. *Life cycle assessment on MWool® by Manteco*. Prato: Manteco S.p.A., 2022.

GOMEZ-CAMPOS, Alejandra et al. Flax fiber for technical textile: a life cycle inventory. Journal of Cleaner Production, v. 281, 25 jan. 2021.

GONÇALVES, Anabela et al. Looking for environmental scoring: a case study of a Portuguese cotton white T-shirt made with recycled fiber. Sustainability (Switzerland), v. 16, n. 14, 1 jul. 2024.

GONZALEZ, Victoria; LOU, Xingqiu; CHI, Ting. Evaluating environmental impact of natural and synthetic fibers: a life cycle assessment approach. Sustainability (Switzerland), v. 15, n. 9, 1 maio 2023.

GRAJEWSKI, Damian et al. Analysis of selected IT tools for environmental product assessment. *Applied Sciences (Switzerland)*, v. 14, n. 24, 1 dez. 2024.

IEMI. *Brasil Têxtil 2024: relatório setorial da indústria têxtil brasileira*. São Paulo: IEMI, 2024.

IMRAN, Shahid et al. Assessing the potential of GHG emissions for the textile sector: a baseline study. *Heliyon*, v. 9, n. 11, 1 nov. 2023.

ISO. *Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework (ISO 14040:2006)*. Geneva: International Organization for Standardization, 2006a.

ISO. *Environmental management — Life cycle assessment — Requirements and guidelines (ISO 14044:2006)*. Geneva: International Organization for Standardization, 2006b.

ISO. *Environmental management systems — Guidelines for incorporating ecodesign*. Geneva: International Organization for Standardization, 2020.

JASINEVIČIUS, Gediminas et al. Carbon accounting in harvested wood products: assessment using material flow analysis resulting in larger pools compared to the IPCC default method. *Journal of Industrial Ecology*, v. 22, n. 1, p. 121–131, 1 fev. 2018.

KIM, Harrison et al. Research perspectives in ecodesign. *Design Science*, v. 6, 19 nov. 2020.

KLOS, Zbigniew Stanislaw; KASPRZAK, Jędrzej; KALKOWSKA, Joanna. *Towards a sustainable future: life cycle management — challenges and prospects*. Cham: Springer International Publishing, 2021.

KOTHARI, V. K. Polyester and polyamide fibres – apparel applications. In: DEOPURA, B. L. et al. (ed.). *Polyesters and Polyamides*. Cambridge: Woodhead Publishing, 2008. p. 419–440.

KLÖPPFER, W.; CURRAN, M. A. (eds.). *LCA Compendium – The Complete World of Life Cycle Assessment*. Dordrecht: Springer, 2015.

LA ROSA, Angela D.; GRAMMATIKOS, Sotirios A. Comparative life cycle assessment of cotton and other natural fibers for textile applications. *Fibers*, v. 7, n. 12, 2019.

LI, Changting et al. Carbon–water–energy footprint impacts of dyed cotton fabric production in China. *Journal of Cleaner Production*, v. 467, p. 142898, 15 ago. 2024.

LIU, Zhu et al. Carbon Monitor: a near-real-time daily dataset of global CO₂ emission from fossil fuel and cement production. *Scientific Data*, v. 7, 2020.

MARCINKOWSKI, Andrzej; PONIECKA, Agata; BARBURSKI, Marcin. Life cycle assessment of flax fiber technical embroidery-reinforced composite. *Polymers*, v. 17, n. 13, 1 jul. 2025.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (Brasil). Acordo de Paris. Disponível em: <https://antigo.mma.gov.br/clima/convencao-das-nacoes-unidas/acordo-de-paris.html>. Acesso em: 17 abr. 2025.

MULROW, John et al. The state of carbon footprint calculators: an evaluation of calculator design and user interaction features. *Sustainable Production and Consumption*, v. 18, p. 33–40, 1 abr. 2019.

MUSA, S. Danlami et al. China's energy status: a critical look at fossils and renewable options. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 81, p. 2281–2290, 1 jan. 2018.

MUTHU, Subramanian Senthilkannan. Handbook of Life Cycle Assessment (LCA) of Textiles and Clothing. Oxford: Elsevier, 2015.

NASA. Evidence: Climate Change. NASA Science – Earth Science, 2025. Disponível em: <https://climate.nasa.gov/>. Acesso em: 12 nov. 2025.

NAUTIYAL, Mitali et al. Legacy datasets and their impacts: analysing Ecoinvent's influence on wool and polyester LCA outcomes. Sustainability (Switzerland), v. 17, n. 14, 1 jul. 2025.

NAVARRETE, Sabrina Della Santa; BORINI, Felipe Mendes; AVRICHIR, Ilan. Environmental upgrading and the United Nations Sustainable Development Goals. Journal of Cleaner Production, 10 ago. 2020.

OMNICAL SOLUTIONS. Methodology — The 2030 Calculator by Omnical Solutions. Disponível em: <https://www.2030calculator.com/docs/methodology>. Acesso em: 2 maio 2025a.

OMNICAL SOLUTIONS. Omnical. Disponível em: <https://omnical.io/>. Acesso em: 1 maio 2025b.

ONU. Objetivos do Desenvolvimento Sustentável. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>. Acesso em: 2 fev. 2025.

PACHAURI, R. K.; REISINGER, Andy; BERNSTEIN, Lenny (eds.). Climate change 2007: synthesis report. Geneva: Intergovernmental Panel on Climate Change, 2013.

RANA, S. et al. Life cycle assessment of cotton textiles and clothing. In: MUTHU, S. S. (ed.). Handbook of Life Cycle Assessment (LCA) of Textiles and Clothing. Oxford: Elsevier, 2015. p. 195–216.

ROOS, Sandra et al. Environmental assessment of Swedish fashion consumption: five garments — sustainable futures. Stockholm: Mistra Future Fashion, 2015.

VIDAL SALEM. Tingimento Têxtil. 2010.

SAMUELE, Abagnato; RIGAMONTI, Lucia; GROSSO, Mario. Life cycle assessment applications to reuse, recycling and circular practices for textiles: a review. *Waste Management*, v. 182, p. 74–90, 15 jun. 2019.

SANTOS, Rute; ABREU, Maria José. Impact assessment and product life cycle analysis of different jersey fabrics using conventional, post-industrial, and post-consumer recycled cotton fibers. *Sustainability (Switzerland)*, v. 17, n. 13, 1 jul. 2025.

SAUNOIS, Marielle et al. The global methane budget 2000–2017. *Earth System Science Data*, v. 12, n. 3, p. 1561–1623, 15 jul. 2020.

SCHÄFER, Malte; LÖWER, Manuel. Ecodesign — a review of reviews. *Sustainability (Switzerland)*, v. 13, n. 1, p. 1–33, 1 jan. 2021.

SCHROEDER, Patrick; ANGGRAENI, Kartika; WEBER, Uwe. The relevance of circular economy practices to the Sustainable Development Goals. *Journal of Industrial Ecology*, v. 23, n. 1, p. 77–95, 1 fev. 2019.

SENN, J.; REINHARDT, G.; GÄRTNER, S. Environmental footprints of cotton and cotton fibres. Heidelberg: IFEL, 2022.

SHEN, Li; KUMAR PATEL, Martin. Life cycle assessment of man-made cellulose fibres. [S.l.]: [s.n.], [s.d.]. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/50925966>

SHEN, Li; WORRELL, Ernst; PATEL, Martin K. Comparing life cycle energy and GHG emissions of bio-based PET, recycled PET, PLA, and man-made cellulotics. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, v. 6, n. 6, p. 625–639, nov. 2012.

SILVA, Diogo Aparecido Lopes et al. How important is the LCA software tool you choose: comparative results from GaBi, openLCA, SimaPro and Umberto CILCA 2017. *Journal of Life Cycle Assessment Studies*, [s.l.]: [s.n.], [s.d.].

STEUBING, Bernhard et al. The ecoinvent database version 3 (part II): analyzing LCA results and comparison to version 2. *International Journal of Life Cycle Assessment*, v. 21, n. 9, p. 1269–1281, 1 set. 2016.

TEXTILE EXCHANGE. Fashion Industry Trade Policy Request — COP26. 2021a.

TEXTILE EXCHANGE. Textile Exchange and Fashion Industry Charter for Climate Action launch the 2025 Recycled Polyester Challenge, a joint industry initiative. Disponível em: <https://textileexchange.org/news/textile-exchange-and-fashion-industry-charter-for-climate-action-launch-the-2025-recycled-polyester-challenge-a-joint-industry-initiative/>. Acesso em: 29 dez. 2024b.

TEXTILE EXCHANGE. Textile Exchange — Materials Market Report 2024. [S.l.]: Textile Exchange, 2024.

UNFCCC. Conference of the Parties serving as the meeting of the Parties to the Paris Agreement (COP). Bonn: United Nations Framework Convention on Climate Change, [s.d.].

VAN DER VELDEN, Natascha M.; PATEL, Martin K.; VOGTLÄNDER, Joost G. LCA benchmarking study on textiles made of cotton, polyester, nylon, acryl, or elastane. *International Journal of Life Cycle Assessment*, v. 19, n. 2, p. 331–356, fev. 2014.

VAN DER WERF, H. M. G. et al. Hemp fibres for green products: an assessment of life cycle studies on hemp fibre applications. Germany: BAFA GmbH, 2011. Disponível em: <https://www.bafa-gmbh.de>.

VINK, Erwin T. H. et al. Applications of life cycle assessment to NatureWorks™ polylactide (PLA) production. *Polymer Degradation and Stability*, v. 80, n. 3, p. 403–419, 2003.

SIMPSON, W. S.; CRAWSHAW, G. Wool: science and technology. Cambridge: Woodhead Publishing, 2002.

WANG, Youjiang (ed.). Handbook of nonwovens. Cambridge: CRC Press; Woodhead Publishing, 2006.

WIEDEMANN, S. G. et al. Environmental impacts associated with the production, use, and end-of-life of a woollen garment. *International Journal of Life Cycle Assessment*, v. 25, n. 8, p. 1486–1499, 1 ago. 2020.

WOODINGS, Calvin. Regenerated cellulose fibres. Cambridge: CRC Press; Woodhead Publishing, 2001.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. State of the Climate 2024: update for COP29. Geneva: WMO, 2024.

ZHANG, Jin; QIAN, Xiaoming; FENG, Jing. Review of carbon footprint assessment in textile industry. *Ecofeminism and Climate Change*, v. 1, n. 1, p. 51–56, 3 jun. 2020.

ZHANG, Qingyong et al. EU–Russia energy decoupling in combination with the updated NDCs impacts on global fossil energy trade and carbon emissions. *Applied Energy*, v. 356, p. 122415, 15 fev. 2024.

ZHANG, Yun et al. Improved design for textile production process based on life cycle assessment. *Clean Technologies and Environmental Policy*, v. 20, n. 6, p. 1355–1365, 1 ago. 2018.

7 ANEXO 1 – THE 2030 CALCULATOR

O The 2030 Calculator é uma ferramenta digital desenvolvida para simplificar o processo de cálculo da emissão de carbono de produtos, incluindo artigos têxteis, desenvolvido pela Omnical Solutions em parceria com a Doconomy, uma empresa especializada em viabilizar a avaliação dos impactos ambientais em áreas específicas, como *design* de produtos, processos de fabricação, gestão de instalações e logística da cadeia de suprimentos, com o objetivo de transformar dados climáticos em informações para a indústria, melhorando a coleta e a avaliação de métricas ambientais para capacitar organizações em suas decisões (OMNICAL SOLUTIONS, 2024).

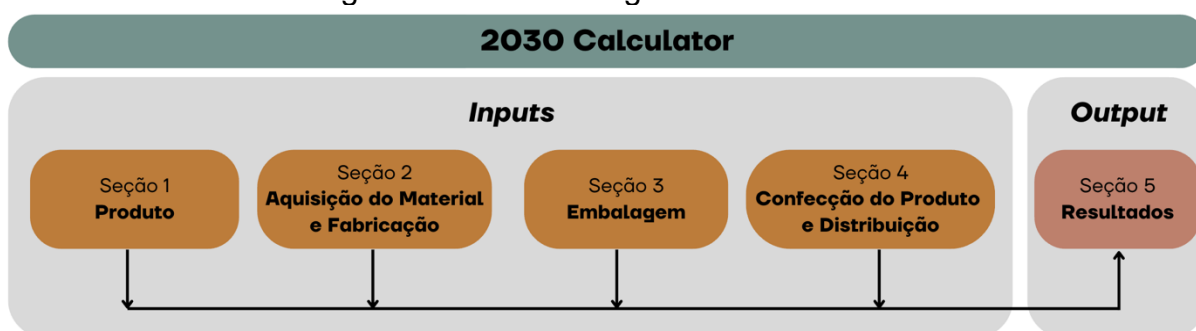
Cientificamente, a quantificação das emissões de carbono de um produto exige metodologias complexas, como ACV e normas ISO, que demandam um alto nível de conhecimento e experiência técnica e acadêmica, além de custos elevados e uma grande demanda de tempo pela equipe interna de uma organização. A calculadora surge como uma solução acessível e intuitiva para marcas e fabricantes que desejam medir e reduzir seu impacto ambiental (MULROW *et al.*, 2019). Além disso, ao utilizá-la, as empresas do setor têxtil podem alinhar-se cada vez mais aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável, que hoje apresentam as principais urgências da atualidade, dentre elas, a redução das emissões de carbono (Navarrete; Borini; Avrichir, 2020). Além disso, a obtenção de dados quantitativos é essencial para a implementação de metodologias de *ecodesign* em empresas, com o objetivo de mapear os pontos de maior impacto no ciclo de vida de produtos, e com isso, optar por decisões que promovam impactos mais positivos.

A ferramenta permite que os usuários realizem um mapeamento detalhado das cadeias de valor de seus produtos, abrangendo aspectos como materiais utilizados, processos produtivos, transporte e embalagem. Para isso, combina dados obtidos de uma base primária, a Ecoinvent, associada com bases secundárias, oferecendo uma visão abrangente do impacto ambiental de cada item analisado. Seu cálculo é baseado no conceito *cradle-to-gate*, ou seja, significa que os cálculos incluem a aquisição dos materiais, processamento e fabricação, confecção, embalagem, transporte e estocagem no centro de distribuição da marca. A logística e deslocamento para o ponto de venda varejista ou para os consumidores, uso do produto e a fase de fim de vida dos itens não são consideradas nos cálculos.

O The 2030 Calculator realiza os cálculos a partir dos *inputs* do próprio usuário, que possui espaços abertos para inserção de informações e opções de seleção pré-definidas, necessárias para a obtenção do resultado. A ferramenta é aplicável em diferentes tipos de produtos da indústria têxtil, incluindo vestuário, sapatos, bolsas e acessórios. É importante ressaltar que a calculadora está em constante aprimoramento, buscando oferecer cada vez mais precisão e funcionalidades aprimoradas para auxiliar as empresas na transição para uma produção de menor impacto.

Para avaliar um produto na plataforma, é necessário cadastrá-lo como um novo item e preencher todos os campos disponíveis com as informações requeridas. No total, a ferramenta é dividida em cinco seções principais, sendo as quatro primeiras (1. Produto; 2. Aquisição do material e fabricação do tecido; 3. Embalagem; 4. Confeção e distribuição), *inputs*, e a última, o *output*, ou seja, são cálculos realizados conforme os *inputs* inseridos nas quatro primeiras seções, conforme representado na Figura 16.

Figura 16 – Estrutura geral da ferramenta



Fonte: A autora (2025)

Os *inputs* seguem a sequência das seções, na ordem definida pela plataforma e os resultados serão apresentados apenas após o preenchimento de todas as partes. Cada seção *input* da calculadora está relacionada com diferentes etapas do processo, componentes do produto acabado e logística. O Quadro 8 apresenta todas as seções e suas respectivas abrangências para os cálculos.

Quadro 8 – Seções e abrangências da ferramenta
Atribuições das seções

SEÇÃO	NOME	DESCRIÇÃO
1	Produto	Referente ao produto acabado que será analisado pelo usuário da plataforma. Os <i>inputs</i> da Seção 1 consistem em informações gerais do item final como nome, massa, categoria de produto (nicho do item), tipo de produto (item final) e código interno.
2	Aquisição do material e fabricação	Consiste na origem e aquisição da fibra ou material e fabricação do tecido. Os <i>inputs</i> baseiam-se nos materiais têxteis presentes na composição do artigo e etapas do seu processo de fabricação, como fiação, construção da estrutura têxtil e beneficiamento, além dos insumos necessários para todas as etapas.
3	Embalagem	Corresponde aos materiais presentes na embalagem escolhida para o produto acabado.
4	Confecção do produto e distribuição	Confecção do produto, levando em consideração o local do confeccionista, fonte de energia utilizada, energia consumida, local do centro de distribuição da marca e tipo de transporte utilizado para transportar as peças acabadas do local de confecção para o local de estocagem, onde os produtos são mantidos antes de serem enviados para o ponto de venda do varejo ou para o consumidor final.
5	Resultados	Consiste no <i>output</i> , ou seja, os resultados da calculadora com base nas Seções dos <i>inputs</i> . Nos resultados, a calculadora apresenta as emissões em quilogramas de CO ₂ e do produto inserido na ferramenta, por etapa de produção, sendo possível mapear quais fases da cadeia produtiva geram maiores contribuições em emissões de carbono.

Fonte: A autora (2025)

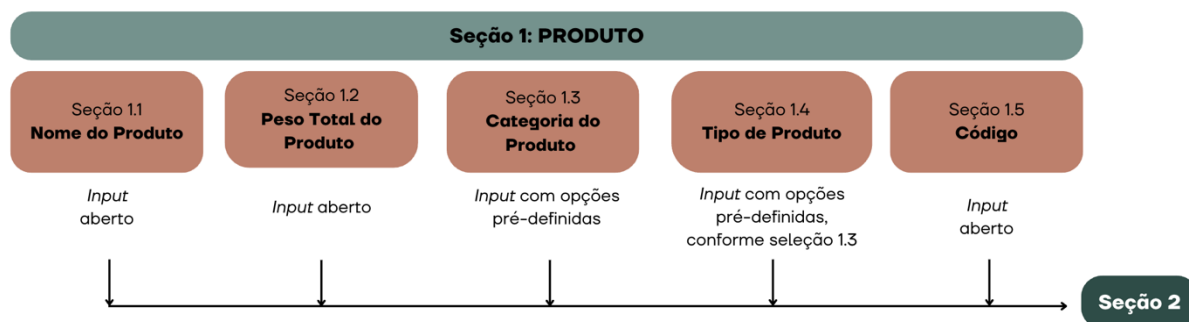
Em todas as quatro primeiras seções, os *inputs*, são consideradas as localizações dos fornecedores e serviços de cada insumo e etapa, para que a logística e transporte de todos os componentes da fabricação do produto sejam considerados nos resultados.

I. Seção 1 - Produto

A Seção 1 refere-se à identificação e informações gerais do produto que será avaliado pela calculadora, onde devem ser preenchidos *inputs* abertos ou pré-

definidos pela ferramenta, sendo eles “Nome do Produto”, “Massa Total do Produto”, “Categoria do Produto”, “Tipo de Produto” e “Código do Produto”, conforme indicado na Figura 17.

Figura 17 – Estrutura da Seção 1



Fonte: A autora (2025)

As Subseções 1.1, 1.2 e 1.5, referentes ao “Nome do Produto”, “Massa Total do Produto” e “Código”, respectivamente, são *inputs* abertos e devem ser preenchidos pelo usuário da plataforma. A Subseção 1.3 e 1.4, referentes a “Categoria de Produto” e “Tipo de Produto”, respectivamente, devem ser selecionados conforme as opções pré-definidas da plataforma. O

Quadro 9 apresenta a descrição das subseções da primeira etapa.

Quadro 9 – Subseções da Seção 1

Seção 1 - Produto		
SUBSEÇÃO	NOME	DESCRIÇÃO
1.1	Nome do Produto	O usuário deve preencher o nome do produto que será registrado pela calculadora para fins de identificação. Cada novo produto registrado na ferramenta, deve conter um nome diferente.
1.2	Massa Total do Produto	Deve ser inserida, em unidade de gramas (g), sem considerar a massa da embalagem do item acabado.
1.3	Categoria do Produto	Está relacionada com o nicho do item, como Bolsas e Acessórios, Vestuário e Sapatos, por exemplo. O usuário deve selecionar este <i>input</i> de acordo com o item que será analisado pela plataforma.
1.4	Tipo de Produto	Com base na seleção da Subseção 1.3, a etapa 1.4, Tipo de Produto, disponibiliza itens relacionados ao nicho, como por exemplo, Camiseta, Jeans e Vestido, para opção Vestuário selecionada na Seção 1.3.

1.5	Código	Refere-se a um <i>input</i> de identificação, um número interno do usuário para obter maior organização e controle em seus cálculos com a ferramenta.
-----	--------	---

Fonte: A autora (2025)

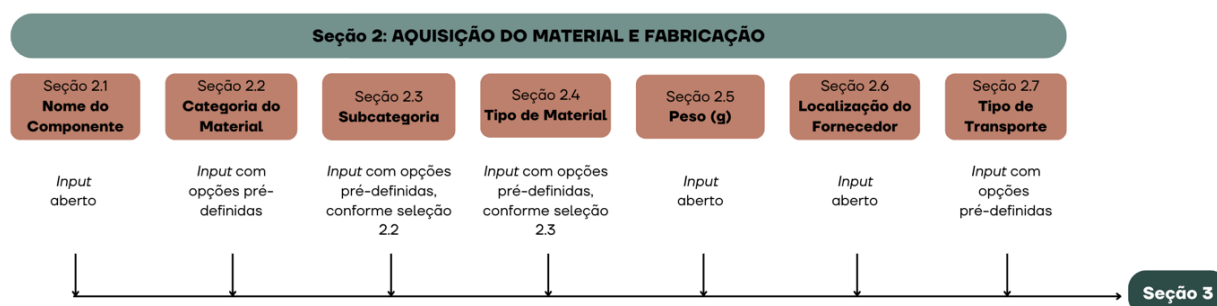
Após o preenchimento de todas as subseções da Seção 1, a plataforma direciona o usuário para a Seção 2.

II. Seção 2 - Aquisição de Material e Fabricação

A Seção 2 refere-se à etapa de fabricação do tecido que será utilizado na confecção do produto acabado. Nesta seção, são inseridos os dados relativos aos diferentes componentes têxteis do artigo, correspondentes às fibras presentes em sua composição. De forma opcional, é possível detalhar as etapas do processo industrial de cada material têxtil, abrangendo desde a fiação até a construção do tecido e os processos de beneficiamento, como mercerização, alvejamento, tingimento e acabamento.

Cada material têxtil que compõe o tecido do produto, denominado nesta fase como “componente”, deve ser registrado individualmente na Seção 2, incluindo os respectivos *inputs* subsequentes, conforme ilustrado na Figura 18.

Figura 18 – Estrutura da Seção 2



Fonte: A autora (2025)

Os *inputs* “Nome do Componente”, “Massa” e “Localização do Fornecedor”, referentes às Subseções 2.1, 2.5 e 2.6, respectivamente, são abertos e devem ser preenchidos manualmente pelo usuário da plataforma. Os *inputs* “Categoria do Material”, “Subcategoria”, “Tipo de Material” e “Tipo de Transporte”, referente às

Subseções 2.2, 2.3, 2.4 e 2.7, respectivamente, são *inputs* com opções pré-definidas pela plataforma, podendo conter dependência com a opção selecionada anteriormente.

Para cada material têxtil presente no tecido do produto acabado a ser avaliado, deve-se adicionar um novo componente na Seção 2, assim como o preenchimento das subseções subsequentes. O Quadro 10 apresenta a descrição das subseções da Seção 2.

Quadro 10 – Subseções da Seção 2
Seção 2 – Aquisição de Material e Fabricação

SUBSEÇÃO	NOME	DESCRIÇÃO
2.1	Nome do Componente	Cada componente inserido na Seção 2 deve conter um nome de identificação, preenchido nesta subseção.
2.2	Categoria do Material	Deve ser selecionada com base nas opções pré-definidas pela plataforma, relacionado com o material do componente em questão. “Químicos”, “Plástico”, “Papel” e “Material Têxtil Cru” são alguns exemplos, que podem ser selecionados nesta subseção.
2.3	Subcategoria	Esta subseção é dependente da subseção anterior, ou seja, a partir da seleção anterior, opções pré-definidas são liberadas pela plataforma. Por exemplo, ao selecionar “Material Têxtil Cru” na Subseção 2.2, são liberadas opções como “Poliéster”, “Algodão” e “Viscose” na Subseção 2.3.
2.4	Tipo de Material	Este <i>input</i> é dependente da Subseção 2.3. Por exemplo, para “Algodão”, selecionado na subseção anterior, as opções “Convencional”, “Orgânico” e “Reciclado” são disponibilizadas para seleção.
2.5	Massa	Massa em unidade de gramas (g). A soma das massas dos componentes que serão adicionados nesta fase, deve ser igual a massa total do produto final, inserido na Subseção 1.2.
2.6	Localização do Fornecedor	A “Localização do Fornecedor” deve ser adicionada individualmente para cada componente, considerando a origem do material.
2.7	Tipo de Transporte	<i>Input relacionado</i> ao deslocamento do componente, que será calculado de acordo com a origem do fornecedor, inserido na Subseção 2.6.

Fonte: A autora (2025)

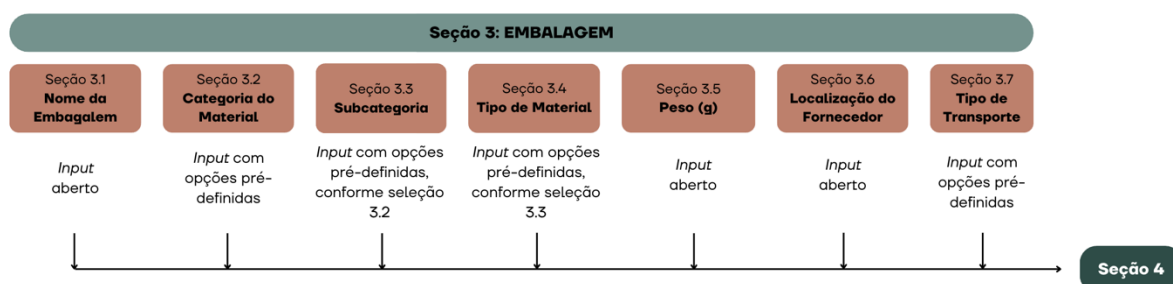
Cada componente inserido na Seção 2 deve contemplar todas as subseções da fase, sendo possível adicionar múltiplos processos específicos para cada componente. Os processos contemplam subseções específicas que abrangem os *inputs* “Categoria de Processo”, “Processo”, “Fonte de Energia”, “Intensidade de Energia”, “Localização do Processo” e “Tipo de Transporte”.

O objetivo desta etapa é fracionar as matérias-primas do produto de acordo com suas origens e classificações, além de inserir etapas específicas do processo, para que seja possível somar e avaliar o maior número de variáveis no desenvolvimento e fabricação de produtos têxteis.

III. Seção 3 - Embalagem

A Seção 3 refere-se aos componentes da embalagem que será utilizada para o produto acabado. As Subseções 3.1, 3.5 e 3.6, referente aos *inputs* “Nome da Embalagem”, “Massa” e “Localização do Fornecedor”, respectivamente, são informações abertas, e devem ser preenchidas pelo usuário da plataforma. As Subseções 3.2 e 3.7, referentes a “Categoria do Material” e “Tipo de Transporte”, respectivamente, são *inputs* com opções pré-definidas pela plataforma, e devem ser selecionadas conforme o material da embalagem utilizada e o método de transporte da embalagem até o local de embrulho do item. As Subseções 3.3 e 3.4, correspondentes aos *inputs* “Subcategoria” e “Tipo de Material”, respectivamente, apresentam opções pré-definidas que variam de acordo com as seleções realizadas nas seções anteriores. Em outras palavras, a escolha da “Categoria do Material” determina as opções disponíveis para a “Subcategoria”, e, de forma análoga, a seleção realizada na Subseção 3.3 influencia as alternativas apresentadas na Subseção 3.4. A Figura 19 representa os *inputs* da seção 3.

Figura 19 – Estrutura da Seção 3



Fonte: A autora (2025)

A Seção 3 tem como objetivo avaliar o impacto ambiental da embalagem no processo. A Quadro 11 apresenta a descrição de cada subseção desta etapa.

Quadro 11 – Subseções da Seção 3

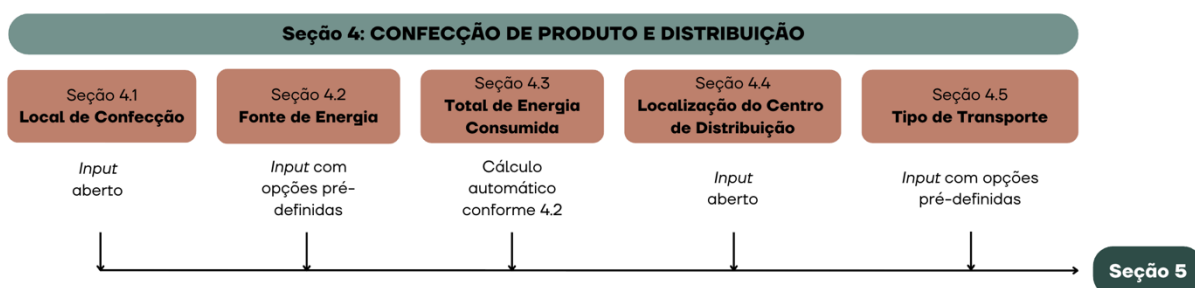
Seção 3 - Embalagem		
SUBSEÇÃO	NOME	DESCRIÇÃO
3.1	Nome da Embalagem	Este <i>input</i> tem como objetivo identificar individualmente as partes das embalagens envolvidas.
3.2	Categoria do Material	A categoria do material deve ser selecionada nesta seção, como por exemplo, “Plástico” e “Papel”.
3.3	Subcategoria	Conforme a categoria do material selecionada na subseção anterior, opções relacionadas são liberadas em “Subcategorias”. Por exemplo, ao selecionar “Plástico” na Subseção 3.2, a plataforma disponibiliza “Poliuretano”, “Polipropileno”, entre outras opções na Subseção 3.3.
3.4	Tipo de Material	O <i>input</i> “Tipo de Material” é dependente da Subseção 3.3. Por exemplo, para “Polipropileno”, selecionado na subseção anterior, as opções “Média” e “Reciclado” são disponibilizadas para seleção.
3.5	Massa	O usuário da plataforma deve inserir a massa da embalagem, na unidade de gramas.
3.6	Localização do Fornecedor	A localização do fornecedor da embalagem em questão deve ser preenchida e selecionada pelo usuário da plataforma. A ferramenta realizará os cálculos de logística.
3.7	Tipo de Transporte	O método de transporte da embalagem, partindo do fornecedor, deve ser selecionado pelo usuário.

Fonte: A autora (2025)

IV. Seção 4 - Confeção de produto e distribuição

A Seção 4 está relacionada com o recebimento das matérias-primas necessárias para a confecção e confecção do produto, distribuição do estoque e consumo de energia no processo, conforme a representação Figura 20.

Figura 20 – Estrutura da Seção 4



Fonte: A autora (2025)

O Quadro 12 descreve os *inputs* da Seção 4.

Quadro 12 – Subseções da Seção 4

Seção 4 – Confeção de Produto e Distribuição		
SUBSEÇÃO	INPUT	DESCRIÇÃO
4.1	Local de confecção	Local de chegada da matéria-prima e processos de confecção do produto final.
4.2	Fonte de energia	A plataforma disponibiliza duas opções pré-definidas, são elas “National Grid Mix” e “Renewable Source”, com tradução direta para o português como “Mescla da Rede Elétrica Nacional” e “Energia Renovável”, em que o país de confecção, adicionado na subseção 4.1, será levado em consideração para o cálculo automático da subseção 4.3.
4.3	Total de energia consumida	A energia consumida é automaticamente preenchida pela plataforma conforme o tipo do material do produto e massa.
4.4	Localização do centro de distribuição da marca	Após a confecção, os produtos serão enviados para o local de estocagem da marca dos itens acabados, prontos para serem enviados para os pontos de venda do varejo ou para o consumidor final.

4.5	Tipo de transporte	Refere-se ao meio utilizado para transportar os produtos do local de confecção para o centro de distribuição da marca.
-----	--------------------	--

Fonte: A autora (2025)

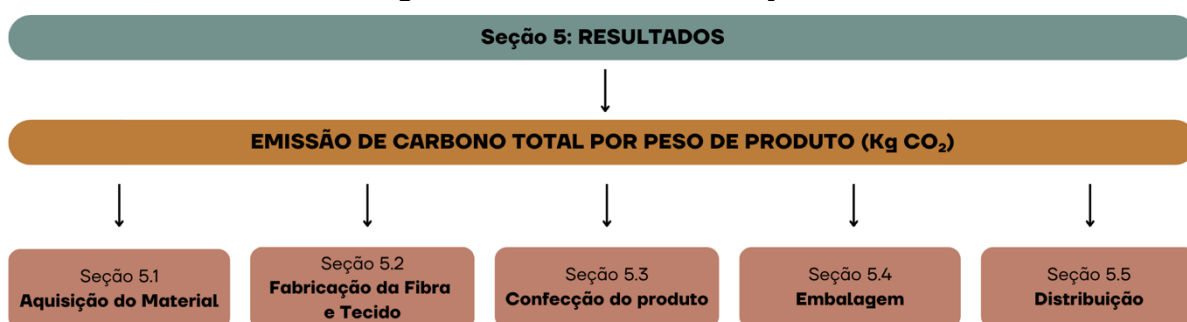
As subseções 4.1 e 4.4, referente a “Local de Confecção” e “Localização do Centro de Distribuição da Marca”, respectivamente, são *inputs* abertos e devem ser preenchidos pelos usuários da plataforma. As subseções 4.2 e 4.5, “Fonte de Energia” e “Tipo de Transporte”, respectivamente, possuem opções pré-definidas pela plataforma. A subseção 4.3 é calculada automaticamente pela ferramenta através do *input* 4.1.

V. Seção 5 - Resultados

A Seção 5 refere-se ao *output*, ou seja, os resultados dos cálculos a partir dos *inputs* inseridos nas Seções 1, 2, 3 e 4. A emissão total de CO₂e calculada para cada produto é em quilogramas de dióxido de carbono equivalente (kg CO₂e).

A plataforma fraciona o resultado total de CO₂e em cinco diferentes partes, sendo elas, “Aquisição do Material”, “Fabricação do Material”, “Confecção do Produto”, “Embalagem” e “Distribuição”, conforme representado na Figura 21.

Figura 21 – Estrutura da Seção 5



Fonte: A autora (2025)

VI. Metodologia e base de dados do software

A metodologia da plataforma The 2030 Calculator é baseada nas normas ISO 14040 e 14044 para análise do ciclo de vida e ISO 14067 para mensurar as emissões de carbono dos produtos. O indicador GWP100, no qual as emissões de carbono são

expressas é o equivalente em dióxido de carbono. A taxa total de carbono apresentada pelos resultados da ferramenta abrange as emissões diretas e remove as emissões relacionadas à obtenção de fontes fósseis, como carvão mineral, gás natural e petróleo, fontes biogênicas e mudanças diretas no uso da terra.

Os cálculos de emissões de carbono realizadas pela ferramenta abrangem o modelo *cradle-to-gate* via ACV, implementado através das normas ISO mencionadas. A ferramenta não tem como objetivo fornecer uma avaliação complexa de emissão de gases de efeito estufa de um produto, como seria o propósito de uma implementação personalizada e com elevada precisão em uma organização, mas sim fornecer dados para autodeclaração do fabricante ou da marca para o produto. Para outros fins, especialistas em ACV devem ser responsáveis por tais implementações, ou seja, os dados obtidos pela The 2030 Calculator não são indicados para serem usados para relatórios externos ou governamentais, e sim para autocontrole e uso da empresa para o próprio produto.

A unidade utilizada para realização dos cálculos, a partir do qual os resultados são obtidos, é a unidade de produto, definido com base na sua massa total. Ou seja, o cálculo total é realizado para cada unidade de produto inserido na ferramenta e utiliza sua massa, em gramas, como base de cálculo.

Seu cálculo é baseado no modelo *cradle-to-gate*, o que significa que os cálculos incluem a aquisição dos materiais, processamento e fabricação, confecção, embalagem, transporte e estocagem no centro da marca. A distribuição para o ponto de venda do varejo ou para os consumidores, o uso do produto e a fase de fim de vida dos itens não são consideradas.

No contexto da metodologia ACV, a “alocação” refere-se ao procedimento de distribuição das emissões e remoções associadas a processos que possuem múltiplas entradas e/ou saídas. Esse desafio é particularmente relevante em sistemas multifuncionais, como aqueles que produzem mais de um bem ou coproduto a partir do mesmo processo produtivo, bem como em fluxos que envolvem reciclagem de materiais (Omnical Solutions, 2024a) .

Para lidar com esses cenários, o The 2030 Calculator adota o modelo de sistema denominado *cut-off by classification*, cuja lógica baseia-se, principalmente, em critérios econômicos para a alocação dos impactos ambientais. Ou seja, se uma indústria fabrica dois artigos com uma mesma matéria-prima, as emissões de carbono

associadas aos itens serão distribuídas conforme seus respectivos valores econômicos de venda e valor agregado.

Referente à materiais virgens e reciclados, as emissões são atribuídas ao primeiro usuário do material, considerando que a produção primária de recursos e fabricação que iniciou a demanda. Em outras palavras, o material virgem carrega consigo todos os impactos da sua extração e processamento inicial, sendo esta responsabilidade do produtor primário, ou seja, a fabricação do produto a partir de matéria-prima virgem.

Para materiais reciclados, a plataforma adota a abordagem *recycled content*, na qual resíduos que são reinseridos no ciclo produtivo não transferem os impactos da produção primária para os usuários seguintes. Em outras palavras, materiais reciclados estão disponíveis sem atribuição de cargas ambientais para os cálculos das etapas anteriores, apenas os impactos relativos ao processo de reciclagem são considerados nos cálculos das emissões de carbono do produto acabado.

Os fatores de emissão ou conjuntos de dados para materiais e processos são obtidos a partir de uma combinação de fontes licenciadas e de acesso aberto, incluindo Ecoinvent, IVL (Instituto Ambiental Sueco), DEFRA (Departamento de Meio Ambiente, Alimentação e Assuntos Rurais do Reino Unido), artigos acadêmicos e dados próprios do ACV. O Ecoinvent é utilizado como principal fonte para a maioria dos fatores, inclusive amplamente utilizado como base para calculadoras de emissão de carbono renomadas e utilizadas pelas maiores organizações mundiais, e ainda assim, é rotineiramente comparado com outras fontes disponíveis para verificar sua plausibilidade e aplicabilidade.

Os conjuntos de dados são selecionados com base em critérios que garantam representatividade geográfica, técnica e temporal, além de incluírem todos os fluxos relevantes de recursos e energia. A fonte é verificada por uma terceira parte especializada e independente. Para materiais, estão inclusos todos os fluxos relevantes de recursos e energia necessários para produção do material, disponíveis em diferentes estágios de processamento. Alguns materiais são apresentados como acabados ou semiacabados, já tendo passado por diversas etapas de transformação, enquanto outros são disponibilizados como matéria-prima, exigindo que as etapas de processamento sejam adicionadas separadamente. Os dados utilizados pela ferramenta são específicos para o material ou a tecnologia de processo selecionada, mas representam uma média da indústria em termos de intensidade de emissões. A

seleção dos dados segue uma abordagem conservadora, o que significa que, sempre que possível, opta-se por conjuntos com valores mais elevados, a fim de evitar a subestimação dos impactos ambientais (Omnical Solutions, 2024a).

Para materiais com alto grau de processamento, nos quais não há dados específicos disponíveis, foram calculados conjuntos de dados personalizados, utilizando fatores de emissão relativos às matérias-primas e processos.

Para manufatura, está inclusa a etapa de processamento de materiais no ciclo de vida do produto. Cada fator de processamento de material engloba todos os fluxos relevantes de recursos e energia necessários para transformar o material de uma fase para outra. Quando aplicável, esses fatores também incluem as emissões associadas à produção da instalação de processamento, incluindo o uso de máquinas.

A obtenção do material bruto antes do processamento não é considerada nos fatores de processo, sendo contabilizada separadamente nos fatores de material. Para cada material presente na base de dados do The 2030 Calculator, estão disponíveis opções relevantes de processamento compatíveis com o material escolhido.

As emissões relacionadas à embalagem do produto e ao transporte entre unidades de fabricação são excluídas dos fatores de processo. Essas etapas do ciclo de vida do produto são tratadas separadamente nas seções específicas de embalagem e transporte da ferramenta.

A modelagem de recursos e energia na ferramenta é realizada com dados caracterizados por ACV, em que se adotou o modelo Potencial de Aquecimento Global para 100 anos (GWP100), conforme os valores atualizados no Sexto Relatório de Avaliação do IPCC. Esse modelo expressa os diferentes potenciais de aquecimento dos gases de efeito estufa em unidades equivalentes de dióxido de carbono em 100 anos. Dessa forma, o metano e o óxido nitroso, por exemplo, são convertidos respectivamente em 27,2 e 273 vezes o impacto do CO₂e, refletindo seus diferentes potenciais de retenção de calor na atmosfera. A aplicação deste modelo assegura maior comparabilidade internacional dos resultados e maior precisão na quantificação das emissões associadas ao uso de energia e matérias-primas nos processos produtivos analisados (Calvin *et al.*, 2023; ISO, 2006a, 2006b).

O uso de eletricidade é fragmentado em todos os conjuntos de dados que abrangem as etapas de fabricação e confecção. Os conjuntos de dados de eletricidade são automaticamente atribuídos a cada processo com base na localização

informada. No caso da produção de materiais, as emissões associadas ao uso de eletricidade não são desagregadas dos conjuntos de dados, sendo aplicada, portanto, uma média global da indústria.

As emissões decorrentes do uso de eletricidade são calculadas utilizando a abordagem *market-based approach*, ou seja, quando a fonte da eletricidade utilizada é desconhecida ou quando não há um instrumento contratual específico, as emissões são calculadas com base na opção “*National Grid Mix*”, traduzido como “Mescla da Rede Elétrica Nacional”. Quando é utilizado um contrato de fornecimento de eletricidade renovável, é possível aplicar a opção Energia Renovável, que considera uma média global de fontes renováveis.

Os fatores de emissão utilizados para “Mescla da Rede Elétrica Nacional” nos países europeus são obtidos a partir da *Association of Issuing Bodies* (AIB). Para países fora da Europa, os fatores de emissão referem-se à mescla nacional de produção de eletricidade e são provenientes da base de dados Ecoinvent.

As emissões provenientes do transporte e logística são calculadas a partir das distâncias dos deslocamentos, a massa da carga transportada e o fator de emissão correspondente ao tipo de transporte utilizado. As distâncias entre cada instalação na cadeia de valor são estimadas com base na distância em linha reta, entre as localizações. Posteriormente, são aplicados fatores de ajustes específicos para cada tipo de transporte, a fim de corrigir o fato de que o transporte real não ocorre em linha reta.

Os fatores de emissão para transporte são derivados das bases de dados Ecoinvent e Network for Transport Measures (NTM). Esses fatores abrangem o uso de combustível, energia e as emissões de gases de efeito estufa relacionadas ao transporte de quatro tipos, sendo eles rodoviário, ferroviário, marítimo e aéreo, com diversas opções de tamanho e capacidade para cada tipo de transporte. O transporte rodoviário é dividido em duas categorias, sendo elas caminhão rígido ou reboque. Cada opção é subdividida de acordo com o massa bruta do veículo (incluindo sua carga). Assume-se uma carga média para todas as opções de transporte. Para o transporte marítimo, é utilizado um fator de emissão médio referente a embarques em contêineres. No caso do transporte ferroviário, a categorização inclui trens elétricos, a diesel e a vapor. Quando não há informações detalhadas sobre a carga ou o tipo de transporte, utiliza-se uma opção média padrão.

Os conjuntos de dados secundários relacionados à confecção de produtos geralmente não são incluídos nos bancos de dados tradicionais de ACV. Para suprir essa lacuna, os conjuntos de dados referentes à confecção foram adotados a partir de Declarações Ambientais de Produto (EPD) e artigos científicos focados nas categorias específicas de produtos analisadas.

A ferramenta recomenda que os usuários insiram dados primários de consumo de eletricidade, sempre que disponíveis, uma vez que o uso de energia pode variar significativamente entre produtos diferentes dentro de uma mesma categoria, garantindo maior precisão no cálculo das emissões associadas à etapa de confecção.

Um dos principais fatores para aumentar a precisão no cálculo das emissões de carbono de um produto, é a utilização de dados específicos da empresa e seus processos de produção, ao invés da utilização de médias associadas à *inputs* genéricos, como “Materiais Têxteis Processados”, presente na Seção 2 da calculadora, que estima uma média de indicadores para substratos têxteis. Essas práticas para alcançar resultados de maior precisão, são inclusive, exigências da norma ISO 14067, que indica que todos os processos sob o controle operacional da organização responsável pelo estudo devem ser baseados em dados primários da própria empresa.

Atualmente, a ferramenta está em desenvolvimento para permitir a aplicação de dados específicos das empresas em todos os processos. Mas até o momento do presente estudo, esses dados podem ser inseridos apenas para o uso de eletricidade e transporte. Além disso, a calculadora está constantemente em ampliação de base de dados e adicionando novas categorias de produtos.

Muitos estudos científicos utilizam as mais diversas calculadoras de emissão de carbono para mensurar impactos ambientais de produtos têxteis, dentre elas, podemos citar GaBi, OpenLCA, SimaPro e Umberto, dentre outras disponíveis no mercado. A escolha da ferramenta para a análise pode abranger diferentes requisitos, dependendo das necessidades específicas da empresa, objetivos do estudo, categorias de impacto mais relevantes e clareza metodológica que se deseja alcançar. Com isso, é essencial entender as diferenças nos fatores de caracterização de cada *software* para avaliação dos resultados, uma vez que todas elas apresentaram divergências de resultados, mesmo com a utilização da mesma metodologia e base de dados (Silva *et al.*, 2017).