

O SETOR DE VESTUÁRIO E AS MUDANÇAS CLIMÁTICAS: CARACTERIZAÇÃO E PERSPECTIVAS DE MITIGAÇÃO POR MEIO DA INOVAÇÃO TECNOLÓGICA E DA ECONOMIA CIRCULAR

*Lucas Coury Silveira¹, Alexandre Toshiro Igari²,
Annelise Vendramini Felsberg³*

¹Programa de Mestrado em Gestão para Competitividade – Linha Sustentabilidade – EAESP/FGV – lucas.esalq@gmail.com

²Programa de Pós-graduação em Sustentabilidade – EACH/USP

³Centro de Estudos em Sustentabilidade – Fundação Getulio Vargas - FGVces

Resumo: O setor de vestuário representa um exemplo marcante dos desafios postos à sociedade, não somente em relação às mudanças climáticas, mas também com relação ao uso de recursos, geração de poluição, apropriação dos benefícios e divisão dos custos dos processos produtivos. O presente capítulo contribui, por meio de uma revisão temática e não exaustiva da literatura, com a caracterização dos emergentes avanços do setor em produtos, processos e tecnologias para a redução de emissões de GEE, desde o desenvolvimento de novos materiais renováveis, de origem biológica (menos intensivos no uso de energia e nas emissões de GEE),

até as perspectivas para a implementação de uma abordagem mais sistêmica e holística sob o prisma da Economia Circular.

Palavras-chave: Inovação para sustentabilidade; Circularidade; Moda sustentável; Ecoeficiência; *Ecodesign*; Tecnologias Limpas.

Abstract: The apparel sector is a remarkable example of the societal challenges posed not only by the changing climate, but also with regard to resource usage, pollution, appropriation of benefits and cost sharing in production processes. The thematic non-exhaustive literature review in this chapter contributes to identifying and characterizing emerging advances in terms of products, processes and technologies for GHG reduction, which range from the development of new renewable biological-origin materials (less energy and GHG emissions intensive) to adoption of more systemic and holistic approaches grounded in the concepts of a circular economy.

Keywords: Innovation for sustainability; Circularity; Sustainable fashion; Ecoefficiency; Ecodesign; Clean Technologies.

1. INTRODUÇÃO

A European Environment Agency aponta que a indústria de têxteis ocupa a quarta posição em termos de impactos ambientais negativos em sua cadeia produtiva, sobretudo em relação ao uso de matérias-primas virgens e consumo de água, sendo também a quinta maior emissora global de gases de efeito estufa (MANSHOVEN *et al.*, 2019). O impacto na emissão de gases de efeito estufa (GEE) gerado pela produção têxtil equivale a todos os voos internacionais e o transporte marítimo juntos, perfazendo um total de 1,2 bilhão de toneladas de CO₂ equivalente emitidos anualmente. A produção de 1 kg de têxteis emite, em média, 20 kg de GEE, e todo ano são consumidos 342 milhões de barris de petróleo para a produção de fibras plásticas têxteis (ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2017). O cenário tendencial indica que a produção têxtil seria responsável, sozinha, em 2050, por 25% do orçamento disponível de emissão de GEE, considerando a meta de limitar o incremento da média de temperatura da Terra a no máximo 2 °C (ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2017).

Dentre as ramificações da indústria têxtil, destaca-se o setor de vestuário, cujos impactos socioambientais negativos aumentaram a partir da primeira década dos anos 2000 com a expansão do modelo de negócios denominado *fast fashion*, que acelerou nesse setor a obsolescência programada dos itens produzidos

e potencializou a reposição prematura de produtos percebidos como ultrapassados segundo os voláteis parâmetros da moda (KOZLOWSKI; BARDECKI; SEARCY, 2014),

De acordo com Zamani, Sandin, Peters (2017, p. 1368), o *fast fashion* é:

[...] um modelo da cadeia de fornecimento de roupas que se destina a responder rapidamente às últimas tendências da moda, atualizando frequentemente os produtos de vestuário disponíveis nas lojas. A mudança para o *fast fashion* leva a uma vida útil prática mais curta para as roupas. (ZAMANI; SANDIN; PETERS, 2017)

O consumo global de vestuário cresceu aceleradamente entre os anos de 1995 e 2018, aumentando de 7,6 kg para 13,8 kg de fibras *per capita* consumidas, um incremento de 82% nesse período. A análise somente do intervalo mais recente mostra que houve 47% de aumento entre os anos 2000 e 2015, período em que o *fast fashion* se tornou o modelo predominante (PETERS; LI; LENZEN, 2021). A média de itens de vestuário produzidos corresponde a aproximadamente 11 pares de jeans e 13 camisetas para cada pessoa por ano no mundo (QUANTIS, 2018). Em uma perspectiva local, foram produzidas mais de 9 bilhões de peças em 2018 no Brasil, o que corresponde a 40 peças por habitante, quantidade expressivamente superior à média global (MODEFICA; FGVCS; REGENERATE, 2020).

Neste contexto, fica evidente que a mitigação dos impactos ambientais negativos do setor de vestuário compreenderia, necessariamente, a reversão do consumo exacerbado de itens de vestuário impulsionado pelo modelo *fast fashion*. Essa transformação envolveria a coordenação de ações coletivas na sociedade, no intuito de reduzir voluntariamente o consumo de itens de vestuário, valendo-se de abordagens de comunicação, convencimento e, principalmente, de desconstrução do significado que as peças de vestuário adquiriram na construção da imagem individual. A redução de consumo de itens de vestuário demandaria também ação precisa do Estado, modulando incentivos ou desincentivos econômicos que permitissem a redução do consumo sem impedir que as camadas mais pobres atendessem suas necessidades básicas e sem inviabilizar a contribuição econômica do setor. Entretanto, o dilema entre desaceleração econômica do setor de vestuário e a mitigação dos impactos ambientais é uma disputa bastante assimétrica, tanto em função do poder político e econômico subjacente a cada uma das posições como em relação à temporalidade e destino da apropriação dos benefícios. Os ganhos econômicos são apropriados exclusivamente por agentes privados e em curto prazo, enquanto os benefícios ambientais são coletivos e predominantemente de longo prazo.

Em meio a essa arena de disputas marcada por dilemas de escolha de soma zero (*trade-offs*), tanto entre os interesses privados e públicos como entre os interesses presentes e futuros, há espaços em que as disputas são menos acirradas, ou até mesmo ausentes, e em que avanços tecnológicos e investimentos produtivos permitiriam ganhos múltiplos e compartilhados. Esses avanços incrementais, apesar de bastante questionáveis quanto à sua suficiência, têm potencial importância na mitigação dos impactos ambientais do setor de vestuário (SILVEIRA, 2021). Nesse sentido, este capítulo apresenta uma caracterização dos principais avanços do setor em produtos, processos e tecnologias para a redução de emissões de GEE, desde inovações pontuais até as perspectivas para a implementação de uma abordagem mais sistêmica e holística sob o prisma da economia circular. O texto está organizado em três seções além desta introdutória, que abordam: procedimentos metodológicos, resultados e discussão, e considerações finais.

2. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Este trabalho desenvolve uma pesquisa qualitativa exploratória cuja estratégia de investigação foi a revisão temática da literatura e a análise de documentos de organizações que implementam inovações em tecnologias e gestão para a mitigação das emissões de gases de efeito estufa no setor de vestuário.

As bases de dados utilizadas nesta pesquisa foram a EBSCO, Science Direct e Google Scholar, além de *websites* de organizações e consultorias que foram citadas nas referências bibliográficas dos artigos científicos incorporados à revisão.

Os principais termos buscados nesta revisão não exaustiva foram: *sustainable fashion; retail fashion; sustainable apparel; sustainable textiles; green technologies; green practices; environmentally sound technologies; clean technologies; circular economy; circularity; sustainable innovation; sustainable supply chain management; environmental impacts fashion industry; climate change*.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Esta seção apresenta os resultados obtidos da revisão temática da literatura quanto aos principais avanços tecnológicos e de gestão, evidenciando também as perspectivas em torno da economia circular como meio para mitigação da emissão de GEE no setor vestuário. Está organizada da seguinte forma: caracterização das emissões de GEE no setor de vestuário; contribuição de inovações tecnológicas para a redução de GEE no setor; e perspectivas para a economia circular na mitigação de emissões.

3.1 Caracterização das emissões de GEE no setor de vestuário

Para que se cumpra a meta de que o planeta sofra um aquecimento inferior a 2 °C, é necessário um corte de 80% das emissões industriais até 2050 (IPCC, 2014; QUANTIS, 2018). Neste sentido, o setor de vestuário precisa contribuir cortando suas emissões até 2030 em mais de 50% em relação a 2018 (MCKINSEY, 2020). As estratégias para esta mitigação contemplam a descarbonização da base energética, controle de emissões agrícolas, gerenciamento de energia e de materiais intensivos em GEE e aplicação de tecnologias com saldo negativo de emissões (COLIN; VAILLES; HUBERT, 2020, p. 13).

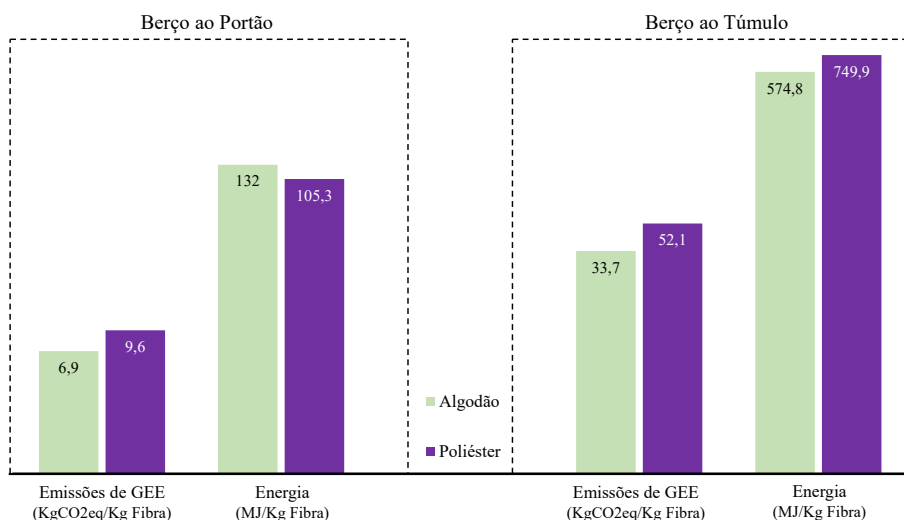
Há, entretanto, divergências metodológicas que resultam em estimativas distintas das emissões do setor de vestuário. O Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas estima que o setor seja responsável por aproximadamente 10% das emissões globais de GEE quando incluída a fase de uso do vestuário, que envolve lavagem, secagem e passadoria (NIINIMAKI *et al.*, 2020). Já Quantis (2018) afirma que somente a indústria de vestuário é responsável por 6,7% das emissões, desconsiderando nessa estimativa a fase de uso das peças, que é apontada como responsável por 14% das emissões do consumo de roupas (NIINIMAKI *et al.*, 2020). Outra estimativa é apresentada no relatório publicado em 2020 pela consultoria McKinsey (MCKINSEY, 2020), que concluiu que o setor de vestuário emite anualmente 2,1 bilhões de toneladas de GEE, o equivalente a 4% das emissões totais globais.

As estimativas de emissões são ainda mais desafiadoras quando se leva em consideração que o setor de vestuário é caracterizado por ser uma cadeia longa e globalmente descentralizada, que contempla a produção de fibras, fiação, tingimento, tecelagem, malharia, acabamento, confecção, atacado e varejo (ABIT, 2017). Grande parte do setor de vestuário está instalada em países como China e Índia, que são altamente dependentes de carvão mineral e gás natural em sua matriz energética, contribuindo para que a pegada de carbono do processo fabril seja bastante expressiva (QUANTIS, 2018). Outro aspecto que contribui substancialmente para o volume de emissões do setor é a ineficiência do processo produtivo, que apresenta uma perda de até 10% dos materiais empregados na manufatura (ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2017). Apesar da globalização da cadeia produtiva, é interessante observar que o transporte, majoritariamente marítimo, é responsável por apenas 3% das emissões desse setor, desconsiderando nesta estimativa o impacto da distribuição final para o cliente (QUANTIS, 2018).

Em relação às fibras empregadas, há um consenso na literatura de que o poliéster é a fibra de maior impacto na emissão de GEE (MODEFICA; FGVCS;

REGENERATE, 2020). Considerando o enfoque do berço ao túmulo (da produção dos insumos até a disposição final), o algodão apresenta valores médios de 33 kg de CO₂/kg fibra, de 2 a 11 mil litros de água/kg de fibra e seu consumo energético varia de 350 a 725 MJ/kg de fibra. O poliéster, por sua vez, emite em média 52 kg de CO₂/kg fibra, utiliza 2.350 litros de água/kg de fibra e chega a consumir 1.118 MJ/kg fibra em energia. Quando a fase de uso é excluída e considerada apenas a etapa do berço ao portão (da produção dos insumos até a expedição na fábrica), os dados mudam muito. Nesse caso, o algodão apresenta 5 kg de CO₂/kg fibra, de 1.700 a 6.500 litros de água/kg fibra e até 138 MJ/kg fibra em termos energéticos. O poliéster emite, nessa etapa, 9,6 kg de CO₂/kg fibra, utiliza 83 litros de água/kg fibra e consome 105 MJ/kg de fibra para ser produzido (MODEFICA; FGVCES; REGENERATE, 2020).

Figura 1 – Impactos climáticos no ciclo de vida de uma peça têxtil



Fonte: adaptada de Modefica, FGVCES e Regenerate (2020, p. 87).

A contribuição da indústria têxtil na emissão de GEE aumentou em 35% entre os anos de 2005 e 2016. Esse aumento está atrelado majoritariamente ao aumento do volume de produção do setor de vestuário e está projetado para continuar aumentando até 2030, se não houver nenhuma grande mudança no modelo atual de negócios, fundamentado na *fast fashion* (QUANTIS, 2018). Há algum alento quando se observa a redução da emissão de GEE por massa de produto, da ordem de 29% entre anos 2000 e 2015, resultante principalmente da redução do consumo de energia na produção de roupas graças aos avanços tecnológicos e à troca de energia fóssil por renovável (PETERS; LI; LENZEN, 2021).

3.2 Contribuição de inovações tecnológicas para a redução de GEE no setor de vestuário

Existem muitos termos relacionados às tecnologias ambientais (ou verdes), incluindo as tecnologias ambientalmente corretas (*environmentally sound technology* – EST), tecnologias de produção limpa, tecnologias de eficiência energética, tecnologias climáticas (GUO *et al.*, 2020) e tecnologias limpas – *clean technologies* ou *cleantechs* (UNEP, 2018). De acordo com Guo *et al.* (2020), tecnologia verde refere-se ao sistema tecnológico que consegue reduzir poluição, aumentar eficiência e proteger os ecossistemas. Nos dispositivos da Agenda 21, foram definidas como aquelas que “protegem o ambiente, são menos poluentes, usam todos os recursos de uma maneira mais sustentável, reciclam mais os seus resíduos e produtos e lidam com os resíduos de maneira ambientalmente amigável” (UNEP, 2018, p. 305). Segundo a UNEP (2016), é preciso não somente que essas soluções sejam primariamente direcionadas às mudanças climáticas, respeitem a biodiversidade e sejam resilientes, mas que também sejam melhores, mais baratas, mais rápidas, universalizáveis e fáceis de usar para que se alcancem os objetivos globais do desenvolvimento sustentável (UNCTAD, 2018)

O avanço tecnológico propõe-se a oferecer soluções para os gargalos do setor de vestuário e criar um caminho para uma nova economia têxtil verde por meio, por exemplo, da oferta de materiais recicláveis que compitam em qualidade e preço com matérias-primas virgens (ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2017). Além das tecnologias de reciclagem, há avanços tecnológicos expressivos nos processos de obtenção de fibras, tingimento, impressão e acabamento, que são ilustrados nos parágrafos a seguir.

O tingimento por CO₂ é um processo praticamente fechado, no qual 95% do CO₂ usado pode ser capturado e reutilizado. O processo é livre de efluentes e consome apenas 50% da energia em relação ao processo tradicional, o que contribui para a redução de emissões de GEE (NAYAK *et al.*, 2020). Outro avanço promissor é o tingimento biológico, no qual são utilizadas enzimas microbianas para produzir tintas têxteis em uma ampla variedade de tons de cores com menor impacto ambiental (PILI BIO, 2020).

Segundo Nayak *et al.* (2020), surgiram muitos materiais naturais na moda para substituir a função de fibras sintéticas como poliéster e nylon. Há materiais desenvolvidos a partir de diversas fontes naturais, como algas marinhas, folha de lótus e de bananeira, cogumelos e resíduos de outras indústrias, como sobras de café moído e cascas de laranja, como é o caso de uma empresa que produz tecidos a partir de subprodutos da laranja (ORANGE FIBER, 2020).

A substituição de fibras de origem animal por alternativas do reino vegetal e *fungi* também representa um caminho promissor para a redução de emissões de GEE, considerando as expressivas emissões associadas à criação de gado para produção de couro (NAYAK *et al.*, 2020). São exemplos a produção de um tecido similar ao couro animal, conhecido no mercado como Piñatex, a partir de cascas de abacaxi (ANANAS ANAM, 2020), e o desenvolvimento de couro produzido a partir de hifas de fungos multicelulares (conhecidas como micélio) em um processo carbono negativo (isto é, que fixa mais GEE do que emite) (MYCOWORKS, 2021). Enquanto isso, outra empresa aplica uma tecnologia denominada Aircarbon, na qual microrganismos oceânicos convertem GEE em biomateriais aplicáveis como substitutos do couro animal (NEWLIGHT, 2021).

Existem esforços tecnológicos também na direção de reduzir a quantidade de energia empregada no processo de reciclagem do poliéster convencional por meio de processos químicos (CURE TECHNOLOGY, 2021). Há também indústrias desenvolvendo um processo de reciclagem química com consumo energético reduzido, utilizando processo de despolimerização de baixo calor e sem pressão (LOOP INDUSTRIES, 2021). Outra opção é a criação de fibras têxteis elásticas com base em CO₂, substituindo parcialmente o emprego da matéria-prima petrolífera virgem em uma técnica em que o poliuretano termoplástico é fundido e prensado em fios muito finos, que possuem uma pegada de carbono menor que outras fibras elásticas tradicionais (COVESTRO, 2021).

O poliéster de base biológica tem potencial de reduzir as emissões de GEE por contemplar uma etapa de captura de carbono durante o seu cultivo, mas hoje ainda representa menos de 1% da produção total de poliéster (TEXTILE EXCHANGE, 2020). Outras empresas possuem tecnologias que produzem essa fibra de origem biológica a partir da cana-de-açúcar, mandioca e milho, mas estão avançando para a utilização de microrganismos para converter gases de efeito estufa em ácido polilático (PLA), que tem propriedades similares aos termoplásticos de fonte fóssil (LANZATECH, 2021). É importante considerar a controvérsia envolvida na aplicação dessas tecnologias quanto à utilização de fontes alimentares para a produção de fibras para vestuário no modelo pouco parcimonioso da *fast fashion*.

Outra frente de inovação tecnológica busca capturar CO₂ e utilizá-lo diretamente como matéria-prima têxtil em processos fixadores de carbono. Há empresas que capturam CO₂ de fontes industriais e o fazem reagir com solventes e catalisadores para gerar produtos químicos que são polimerizados e posteriormente transformados em fios de poliéster (FAIRBRICS, 2021).

Entretanto, a maioria dessas tecnologias é embrionária, e a literatura aponta alguns fatores críticos para sua adoção em larga escala, como “pressão coercitiva, pressão de mercado, capacidade tecnológica, suporte interno, experiência de adoção, sistemas certificados e cooperação” (FU *et al.*, 2018, p. 242; UNEP, 2018). Uma das principais barreiras identificadas é a “popularidade das tecnologias tradicionais”, que recorrentemente impõem a necessidade de investimentos substanciais para sua conversão em processos e tecnologias mais limpas. Além disso, a “popularidade das tecnologias tradicionais” também resulta de um fator sociocultural que resiste às mudanças das práticas necessárias à redução dos impactos negativos ao meio ambiente (GUPTA; KUSI-SARPONG; REZAEI, 2020).

A OCDE (2006) apresenta como pré-requisito para resolver esse desafio a necessidade de existir colaboração intra e entre diferentes ecossistemas industriais. O processo colaborativo pode ocorrer ao longo da cadeia, com o envolvimento de consumidores para identificação de seus anseios e preferências, e também com o envolvimento de fornecedores, com o intercâmbio de informações, de modelos de negócios e de tecnologia, para o desenvolvimento conjunto de novos produtos, processos ou outras inovações (OCDE, 2006).

3.3 Economia circular para mitigação de emissões na moda

A economia circular vem ganhando espaço e atenção em função da busca por maior eficiência no uso de recursos naturais em contraposição ao insustentável modelo convencional de economia linear, cuja lógica sequencial e perdulária do *take-make-waste* gera as mais deletérias consequências ambientais (GEISENDORF; PIETRULLA, 2018). A definição da Ellen MacArthur Foundation para o modelo de economia circular é esta: “uma economia circular é aquela que é restauradora e regenerativa por *design* e visa manter produtos, componentes e materiais em sua maior utilidade e valor em todos os momentos, distinguindo entre ciclos técnicos e biológicos” (2015, p. 2).

Segundo Geisendorf e Pietrulla (2018, p. 779), o cerne da economia circular está em “manter o valor dos produtos e materiais, evitar o desperdício e fazer com que os recursos permaneçam ativos na economia quando um produto chega ao fim da sua vida útil”. De maneira geral, esse conceito busca a reestruturação das atividades econômicas para que estas se tornem regenerativas e livres de resíduos (GEISENDORF; PIETRULLA, 2018), mas não necessariamente implica maior parcimônia ou redução do ritmo dos processos produtivos.

Reike, Vermeulen e Witjes (2018), assim como Corvellec (2020), entendem que a economia circular não seria um novo conceito em sustentabilidade, mas sim

um conceito renovado, baseado em antigas abordagens e que ainda não possui uma definição cristalina, principalmente em relação aos graus de circularidade e normatividade. Esses mesmos autores afirmam que a economia circular possui uma obsessão pela eficiência de recursos, e esta seria uma visão estritamente econômica, com potencial de contribuição apenas incremental e insuficiente para um modelo amplo de desenvolvimento sustentável (REIKE; VERMEULEN; WITJES, 2018; CORVELLEC *et al.*, 2020).

Ainda assim, os benefícios econômicos do modelo circular são numerosos e apresentam uma importante contribuição graças à redução de resíduos a serem descartados e de materiais virgens adquiridos, otimizando os custos envolvidos. A economia circular também pode contribuir com receitas adicionais resultantes da venda dos resíduos que seriam descartados, que preservariam valor para aplicação em outros processos até então ignorados. Além dos ganhos tangíveis, a implementação da economia circular pode também contribuir para a melhoria da imagem e reputação da organização. Em contrapartida, há recorrentemente investimentos substanciais necessários à infraestrutura para os novos processos, com destaque para a operacionalização da logística reversa (SEHNEM *et al.*, 2019).

De acordo com Jia *et al.* (2020), as práticas de economia circular na indústria da moda podem ser divididas em dois tipos: (i) o primeiro tipo refere-se ao desenvolvimento de relacionamentos colaborativos e duradouros com *stakeholders* externos à companhia, especialmente as relações de longo prazo com fornecedores a montante da cadeia, com o objetivo de construir mecanismos para o desenvolvimento conjunto de produtos e processos, por exemplo; (ii) o segundo tipo de prática estaria relacionada à própria execução das atividades na cadeia de fornecimento, com a operacionalização da logística reversa, compatibilização de processos, definição dos parâmetros e regras contratuais, atribuição das responsabilidades e custos, desenvolvimento de materiais, processos e produtos, assim como prospecção de outras cadeias produtivas sinérgicas também adequadas ao fechamento dos ciclos na cadeia produtiva.

O caminho em direção à circularidade também foi delineado por Modifica, FGVCes e Regenerate, que sugerem que as empresas do setor de vestuário incorporem em sua estratégia os seguintes pontos:

- (i) investir recursos no fortalecimento das fibras alternativas, inclusive para aprimoramento e escalabilidade da produção; (ii) assumir a responsabilidade pelos resíduos têxteis da confecção e garantir que os retalhos de pré-consumo da própria produção sejam reciclados; (iii) aplicar práticas de *design* para circularidade e desenvolver produtos pensando para gerar menor impacto e serem reciclados ou corretamente descartados no fim de sua vida útil; (iv) investir em educação ambiental dentro da

estratégia de marketing e publicidade para fomentar o consumo consciente; e (v) testar modelos de negócios alternativos e alinhados com a economia circular. (MODEFICA; FGVCS; REGENERATE, 2020, p. 21)

Dessa maneira, os meios para implantação de uma economia circular dependem de um olhar para todas as fases do ciclo de vida de um produto e do material escolhido, de maneira que, por exemplo, o *design* circular propicie ao longo da cadeia de valor e no pós-uso o compartilhamento, reutilização, reparo, remanufatura e reciclagem, reintroduzindo os resíduos no ciclo produtivo (GEISENDORF; PIETRULLA, 2018). O estímulo a uma economia circular plena também depende do surgimento de novos modelos de negócios que priorizem o acesso em vez da propriedade e propiciem um ciclo reverso de materiais de volta para a cadeia de produção, como insumos dessa mesma indústria ou de outra (ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2015).

Há barreiras técnicas, institucionais, culturais e financeiras na transição para esse modelo circular em escala. Dentre as técnicas, o estágio de maturidade e disponibilidade de tecnologias, como as de reciclagem, é crítico no avanço deste modelo. Nas institucionais, as políticas públicas regulatórias e os incentivos e desincentivos econômicos e tributários favorecem o modelo convencional linear vigente de produção e consumo. Em termos culturais, a mudança de modelo mental e aceitação por parte dos consumidores por esse novo modelo ainda avança lentamente e é uma barreira principalmente no aspecto da troca da propriedade de um produto pelo uso temporário desse mesmo item. Em relação às barreiras financeiras, estas ainda são significativas, em especial em países com dificuldades de financiamento. O custo de desenvolvimento das inovações necessárias para a viabilização da economia circular também são significativos (JESUS; MENDONÇA, 2018; GEISENDORF; PIETRULLA, 2018; JIA *et al.*, 2020; GENOVESE *et al.*, 2017)

No setor de vestuário, o *design* do produto, a escolha da fibra e a produção das peças têm um papel central para viabilizar o fechamento do ciclo e a redução de impactos negativos (MODEFICA; FGVCS; REGENERATE, 2020; ISLAM; PERRY; GILL, 2021). Em termos de emissões de GEE, as fibras naturais emitem menos em comparação com o poliéster. Entre as próprias fibras naturais, existem possibilidades ainda menos impactantes, como o linho, que produz metade das emissões de GEE em comparação ao algodão convencional.

A substituição das fibras sintéticas por fibras naturais é uma forma de reduzir as emissões de carbono, uma vez que as fibras vegetais, como o algodão, a juta, o linho e o cânhamo, sequestram CO₂ atmosférico na etapa agrícola da cadeia

produtiva (MODEFICA; FGVCES; REGENERATE, 2020). A desvantagem, no caso das fibras naturais, é que a fase de uso desses artigos costuma demandar mais energia na lavagem, secagem e passadoria em comparação com os sintéticos (NIINIMAKI *et al.*, 2020), além da extensa ocupação do solo para seu cultivo.

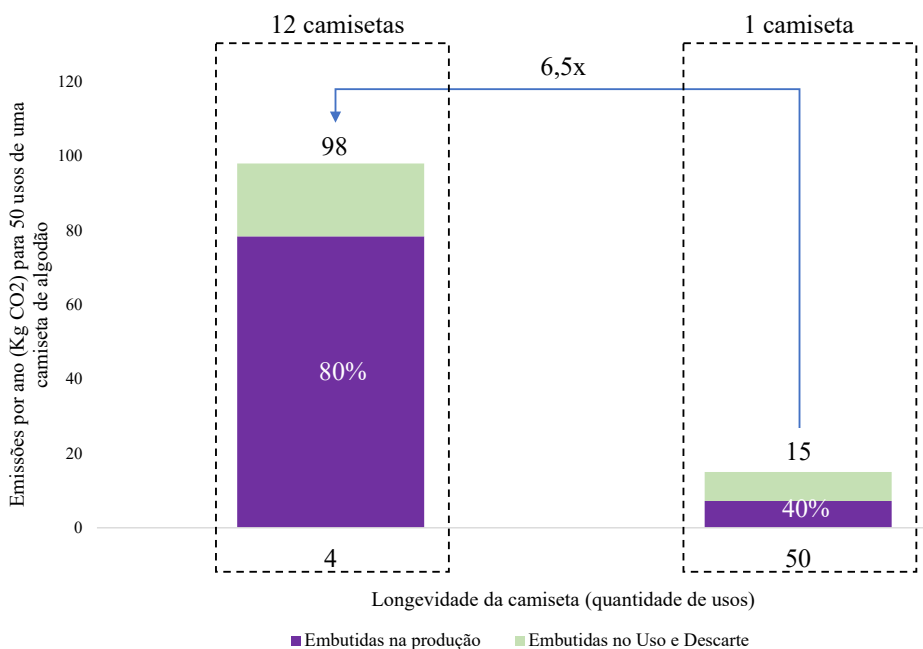
O método de produção das fibras também influencia as emissões de GEE. O cultivo orgânico do algodão tem emissões 58% menores do que o convencional, em virtude da redução de insumos agrícolas, como pesticidas e fertilizantes químicos, e redução da operação mecanizada. O poliéster reciclado emite de 25% a 76% menos GEE a depender da tecnologia utilizada, sendo 76% na reciclagem mecânica, 54% na semimecânica, e 24% na química, economizando de 45% a 85% de energia (MODEFICA; FGVCES; REGENERATE, 2020; NAYAK *et al.*, 2020).

Em relação à reciclagem e reaproveitamento de materiais, Sehnem *et al.* (2019) apontam que o estabelecimento de uma logística reversa eficiente é fundamental para o desempenho do modelo circular. Porém, para viabilizar a reciclagem no pós-uso, é preciso que o *design* inicial das peças de vestuário já contemple a reciclagem ao final do ciclo de vida do produto, priorizando, por exemplo, o uso de monomateriais (compostos de um só tipo de fibra) e componentes têxteis e não têxteis com fácil desmontagem (MODEFICA; FGVCES; REGENERATE, 2020). Esse é um aspecto significativo, porque a reciclagem de algodão ainda é muito limitada, e algumas fibras são consideradas de impossível reciclagem por serem praticamente inseparáveis. O poliéster reciclado, por sua vez, ainda representa apenas 14% do total de fibras de poliéster comercializado, o que denota a necessidade de inovações na reciclagem de produtos têxteis para acelerar a circularidade dos vestuários pós-consumo (NIINIMAKI *et al.*, 2020).

Outro fator preponderante para determinar a pegada de carbono de uma peça é a longevidade do vestuário em questão. Quanto mais durável uma peça de roupa e maior a frequência de uso desta, maior será a diluição ao longo do tempo das emissões iniciais incorporadas em sua produção. É evidente que, neste cenário de maior longevidade, as emissões na fase de uso (lavagem, secagem e passadoria) ganham um peso maior e aumentam proporcionalmente em relação às demais etapas do ciclo de vida da peça. Todavia, a maior durabilidade evita a produção de novas peças para substituição, reduzindo em valores absolutos as emissões totais na fase de produção e descarte desses artigos (THE CARBON TRUST, 2011). Na avaliação de ciclo de vida de uma camiseta de algodão que é usada e lavada 50 vezes, estima-se que são emitidos 15 kg de CO₂eq, 52% deles provenientes da fase de uso e 40% provenientes da produção do vestuário. Em contrapartida, se tivéssemos 12 camisetas de algodão usadas quatro vezes cada

uma, perfazendo 48 usos, a emissão seria de 98 kg de CO₂eq, cerca de 6,5 vezes maior que o primeiro cenário, sendo que mais de 80% dessas emissões seriam oriundas do processo fabril (NIINIMAKI *et al.*, 2020; THE CARBON TRUST, 2011). Destaca-se que a durabilidade ou longevidade do vestuário não depende apenas da qualidade de sua produção, mas também da atemporalidade que o *design* é capaz de lhe conferir para contornar a obsolescência percebida em relação às voláteis tendências da moda (MODEFICA; FGVCES; REGENERATE, 2020).

Figura 2 – Emissões decorrentes de 50 usos de uma camiseta de algodão com premissas variáveis em relação à longevidade da camiseta



Fonte: adaptada de The Carbon Trust (2011, p. 12).

Estima-se que a cada 1% de aumento de penetração de mercado do modelo circular no setor de vestuário ocorra uma redução de emissões de cerca de 13 milhões de toneladas de CO₂ (MCKINSEY, 2020), com a remanufatura representando uma economia de até 17% de material virgem e 7.927 kg de CO₂ na confecção de 10 mil peças de roupa (NIINIMAKI *et al.*, 2020). Contudo, a literatura aponta também para a incapacidade da economia circular de atingir sozinha a meta de redução de emissões necessárias nessa indústria. Se as variáveis fossem isoladas, seria possível concluir que, para atingir a meta de diminuição de 50% das emissões dessa indústria até 2030, seria preciso adotar energia renovável em 78% da cadeia ou então atingir uma meta de 72% de eficiência energética em

processos produtivos. Assim, caso não ocorra alteração substancial da matriz energética global, a economia circular sozinha não seria capaz de atingir a meta de redução de 50% das emissões do setor de vestuário (QUANTIS, 2018).

A transição para a economia circular demanda a colaboração entre várias partes interessadas, como designers, fabricantes, varejistas e consumidores finais (NIINIMAKI *et al.*, 2020; GEISSDOERFER *et al.*, 2019; SEHNEM *et al.*, 2019). As grandes empresas varejistas do setor de vestuário têm papel fundamental nessa transição, por serem as empresas focais e integradoras da cadeia, com grande influência sobre os elos a montante (MODEFICA; FGVCES; REGENERATE, 2020). As empresas focais são aquelas que “(i) regem ou governam a cadeia de fornecimento, (ii) fornecem o contato direto ao cliente e (ii) projetam o produto ou serviço oferecido” (HANDFIELD, 1999 *apud* SEURING; MULLER, 2008, p. 1699).

A dispersão espacial da cadeia de produção do setor de vestuário coloca um desafio substancial para o fechamento dos ciclos de materiais dentro dela mesma. Sua eficiência energética pode ser muito comprometida pelos deslocamentos necessários para disponibilizar os materiais em final de vida útil aos elos a montante da cadeia (SILVEIRA, 2021). Demanda-se então a prospecção e desenvolvimento de elos locais para o fechamento dos ciclos, provavelmente por meio de cadeias produtivas originalmente menos conectadas ou mesmo completamente dissociadas do setor de vestuário. Por esse motivo, as inovações representam um pilar essencial para superar as barreiras técnicas e econômicas dessa transição para a economia circular, viabilizando não apenas a implementação de soluções operacionais locais, mas também inovações de caráter sistêmico (JESUS; MENDONÇA, 2018).

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O setor de vestuário representa um exemplo marcante dos desafios postos à sociedade, não somente em relação às mudanças climáticas, mas também em relação ao uso de recursos, geração de poluição, apropriação dos benefícios e divisão dos custos dos processos produtivos. O presente capítulo contribui para caracterizar os emergentes avanços dos produtos, processos e tecnologia, desde o desenvolvimento de novos materiais renováveis, de origem biológica (menos intensivos no uso de energia e nas emissões GEE), até às perspectivas para a implementação de uma abordagem mais sistêmica e holística para as cadeias produtivas sob a ótica da economia circular.

Por mais ambiciosos e desafiantes que sejam os objetivos da economia circular e das inovações tecnológicas, estes circunscrevem apenas uma parte do

equacionamento e das soluções para o setor de vestuário no caminho do desenvolvimento sustentável. O setor de vestuário sintetiza as questões conflituosas nas quais a sociedade tem que decidir sobre seus padrões de consumo, seus anseios, suas prioridades, suas posições filosóficas, seus valores e suas escolhas quanto à conservação ambiental e justiça social.

Complementarmente aos resultados apresentados no presente capítulo, os estudos sobre o setor de vestuário demandam necessariamente reflexões sobre os aspectos comportamentais e socialmente balizados do consumo de seus produtos, com ênfase na significação e legitimação dessas práticas. Este capítulo tampouco abordou as controvérsias postas e amplamente reconhecidas a respeito da precarização do trabalho no setor, que merece reflexões apropriadas em estudos complementares futuros.

REFERÊNCIAS

- ABIT. **O setor têxtil e de confecção e os desafios da sustentabilidade**. 2017. Disponível em: https://static.portaldaindustria.com.br/media/flater_public/bb/6f/bb6fdd8d-8201-41ca-981d-deef4f58461f/abit.pdf. Acesso em: 10 out. 2020.
- ANANAS ANAM. **The makers of Piñatex**. 2020. Disponível em: <https://www.ananas-anam.com/about-us/>. Acesso em: 10 out. 2020.
- COLIN, A.; VAILLES, C.; HUBERT, R. Scenario analysis of the issues of the low-carbon transition by companies in the TCFD framework. **Institute for Climate Economics**, abr. 2020. Disponível em: <https://www.i4ce.org/wp-core/wp-content/uploads/2020/04/Scenario-analysis-VA.pdf/>. Acesso em: 10 out. 2020
- CORVELLEC, H. *et al.* Introduction to the special issue on the contested realities of the circular economy. **Culture and Organization**, v. 9551, 2020.
- COVESTRO. Dress with CO2. **Covestro Global Corporate Website**, 2 jul. 2019. Disponível em: <https://www.covestro.com/press/dress-with-co2>. Acesso em: 1 fev. 2021.
- CURE TECHNOLOGY. **Cure Polyester Rejuvenation**. 2021. Disponível em: <https://curetechnology.com/>. Acesso em: 1 fev. 2021
- DYECOO. **DyeCoo**, 2019. CO2 Dyeing. Disponível em: <http://www.dyecoo.com/co2-dyeing/>. Acesso em: 10 out. 2020.
- ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. **Rumo a economia circular: o racional de negócio para acelerar a transição**. 2015.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. **A new textiles economy**: redesigning fashion's future. 2017. Disponível em: <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/publications/a-new-textiles-economy-redesigning-fashions-future>.

FAIRBRICS. **Fairbric's technology**. 2021. Disponível em: <https://fairbrics.co/technology/>. Acesso em: 1 fev. 2021

FU, Y. *et al.* Factors affecting sustainable process technology adoption: a systematic literature review. **Journal of Cleaner Production**, v. 205, p. 226–251, 2018.

GEISENDORF, S.; PIETRULLA, F. The circular economy and circular economic concepts – a literature analysis and redefinition. **Thunderbird Int Bus Rev.**, p. 771–782, 2018.

GEISSDOERFER, M. *et al.* The circular economy – A new sustainability paradigm? **Journal of Cleaner Production**, v. 44, n. Sept., 2019.

GENOVESE, A. *et al.* Sustainable supply chain management and the transition towards a circular economy : Evidence and some applications \$. **Omega**, v. 66, p. 344–357, 2017.

GUO, R. *et al.* Classifying green technologies for sustainable innovation and investment. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 153, n. Nov.2019, p. 104580, 2020.

GUPTA, H.; KUSI-SARPONG, S.; REZAEI, J. Barriers and overcoming strategies to supply chain sustainability innovation. **Resources, Conservation & Recycling**, v. 161, n. Jan., 2020.

IPCC. **Climate Change 2014 Synthesis Report Summary Chapter for Policymakers**. 2014.

ISLAM, M.; PERRY, P.; GILL, S. Mapping environmentally sustainable practices in textiles , apparel and fashion industries : a systematic literature review. **Journal of Fashion Marketing and Management**, v. 25, n. 2, p. 331–353, 2021.

JESUS, A. DE; MENDONÇA, S. Lost in transition ? Drivers and barriers in the eco-innovation road to the circular economy. **Ecological Economics**, v. 145, n. Sept. 2017, p. 75–89, 2018.

JIA, F. *et al.* The circular economy in the textile and apparel industry: a systematic literature review. **Journal of Cleaner Production**, v. 259, p. 120728, 2020.

KOZLOWSKI, A.; BARDECKI, M.; SEARCY, C. Environmental Impacts in the Fashion Industry. **Journal of Corporate Citizenship**, v. 2012, n. 45, p. 16–36, 2014.

LANZATECH. **LanzaTech**. 2021. Página inicial. Disponível em: <https://www.lanzatech.com/>. Acesso em: 1 fev. 2020.

MANSHOVEN, S. *et al.* **Textiles and the environment in a circular economy**. 2019.

LOOP INDUSTRIES. **Loop Industries**. 2021. Página inicial. Disponível em: <https://www.loopindustries.com/>. Acesso em: 1 fev. 2020.

MCKINSEY. **Fashion on Climate**. 2021.

MODEFICA; FGVCES; REGENERATE. **Fios da moda: perspectiva sistêmica para circularidade**. 2021.

MYCOWORKS. **MycoWorks**. 2021. Disponível em: <https://www.mycoworks.com/>. Acesso em: 10 out. 2020.

NAYAK, R. *et al.* **Sustainable technologies and processes adapted by fashion brands**. [S.l.]: Elsevier, 2020.

NEWLIGHT. **Newlight**. 2021. Products. Disponível em: <https://www.newlight.com/products>. Acesso em: 1 fev. 2020.

NIINIMAKI, K. *et al.* The environmental price of fast fashion. **Nature Reviews Earth & Environment**, 2020.

OCDE. **Manual de Oslo: diretrizes para coleta e interpretação de dados sobre inovação**. 3. ed. 2006.

ORANGE FIBER. **Orange Fiber**. 2020. Disponível em: <http://www.orangefiber.it/home/>. Acesso em: 10 out. 2020.

PETERS, G.; LI, M.; LENZEN, M. The need to decelerate fast fashion in a hot climate - A global sustainability perspective on the garment industry. **Journal of Cleaner Production**, v. 295, p. 126390, 2021.

PILI BIO. **Pili Bio's Technology**. 2020. Disponível em: <https://www.pili.bio/9/technology/>. Acesso em: 10 out. 2020.

QUANTIS. **Measuring fashion: environmental impact of global apparel and footwear study**. 2018.

REIKE, D.; VERMEULEN, W. J. V; WITJES, S. Resources , conservation & recycling The circular economy : new or refurbished as CE 3.0 ? – Exploring controversies in the conceptualization of the circular economy through a focus on history and resource value retention options. **Resources, Conservation & Recycling**, v. 135, n. Feb. 2017, p. 246–264, 2018.

SANDIN, G.; PETERS, G. M. Environmental impact of textile reuse and recycling – A review. **Journal of Cleaner Production**, v. 184, p. 353–365, 2018.

SEHNEM, S. *et al.* Circular economy: benefits, impacts and overlapping. **Supply Chain Management**, v. 6, n. Aug. 2018, p. 784–804, 2019.

SEURING, S.; MÜLLER, M. From a literature review to a conceptual framework for sustainable supply chain management. **Journal of Cleaner Production**, v. 16, n. 15, p. 1699-1710, 2008.

SILVEIRA, L. **Práticas empresariais de inovação para sustentabilidade para o combate às mudanças climáticas**. Dissertação (Mestrado em Gestão para Competitividade - linha Sustentabilidade) – Escola de Administração de Empresas de São Paulo, Fundação Getulio Vargas. São Paulo, 2021.

TEXTILE EXCHANGES. **Preferred Fiber & Materials: Market Report 2020**. Disponível em: https://textileexchange.org/wp-content/uploads/2020/06/Textile-Exchange_Preferred-Fiber-Material-Market-Report_2020.pdf.

THE CARBON TRUST. **International carbon flows clothing**. 2011.

UNCTAD. **Technology and Innovation Report**. Geneva: United Nations, 2018. (V. 54)

UNEP. **Transformando nosso mundo: a agenda 2030 para o desenvolvimento sustentável**. [S.l.], 2016.

UNEP. **Trade in environmentally sound technologies: implications for developing countries**. [S.l.], 2018. Disponível em: <https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/27595/TradeEnvTech.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso: 14 jan. 2022.

ZAMANI, B.; SANDIN, G.; PETERS, G. M. Life cycle assessment of clothing libraries: can collaborative consumption reduce the environmental impact of fast fashion? **Journal of Cleaner Production**, v. 162, p. 1368–1375, 2017.