

# 9

**Smart clothing e resíduos eletroeletrônicos:  
implicações de heurísticas de design para a  
sustentabilidade na extensão do ciclo de vida**

## **SMART CLOTHING E RESÍDUOS ELETROELETRÔNICOS: IMPLICAÇÕES DE HEURÍSTICAS DE DESIGN PARA A SUSTENTABILIDADE NA EXTENSÃO DO CICLO DE VIDA**

### **SMART CLOTHING AND ELECTRONIC WASTE: IMPLICATIONS OF DESIGN HEURISTICS FOR SUSTAINABILITY IN LIFE CYCLE EXTENSION**

*Fernanda de Oliveira Massi*

fernanda.massi@ufpr.br – Universidade Federal do Paraná (UFPR)

*Aguinaldo dos Santos*

asantos@ufpr.br – Universidade Federal do Paraná (UFPR)

*Natalia Ferraz Reis*

nataliareis@ufpr.br – Universidade Federal do Paraná (UFPR)

**Resumo:** Com o avanço de tecnologias emergentes na moda e o desenvolvimento de *smart clothing*, surge a perspectiva de um novo resíduo no setor, o e-waste, ou resíduo eletroeletrônico. Portanto, torna-se relevante uma investigação a respeito de formas de mitigar os impactos ambientais de REEE proveniente de *smart clothing*, ainda na etapa conceitual do design desses produtos. Desta forma, esta pesquisa visa identificar, na literatura, os principais conceitos, ênfases e desafios de sustentabilidade em *smart clothing*, assim como relacionar as especificidades deste tipo de produto com heurísticas já existentes com foco na extensão do ciclo de vida. Para isso, foi utilizado o método Revisão Bibliográfica Sistemática e Assistemática. Como resultado obteve-se três tabelas com heurísticas voltadas ao reuso, reparo e reciclagem e as implicações de cada uma delas em *smart clothing*. Espera-se que estes resultados forneçam bases para pesquisas mais aprofundadas em REEE, provenientes de *smart clothing*, assim como verificação e validação das heurísticas investigadas.

**Palavras-chave:** *smart clothing*; resíduo eletroeletrônico; heurísticas.

**Abstract:** *With the advancement of emerging technologies in fashion and the development of smart clothing, the perspective of a new waste in the sector arises, the e-waste, or electronic waste. Therefore, it becomes relevant to investigate ways to mitigate the environmental impacts of WEEE from smart clothing still in the conceptual stage of the design of these products. In this way, this research aims to identify in the literature the main concepts, emphases and challenges of sustainability in smart clothing, as well as to relate the specificities of this type of product with existing heuristics focused on the extension of the life cycle. For this, the Systematic and Unsystematic Bibliographic Review method was used. As a result, three tables were obtained with heuristics focused on reuse, repair and recycling and the implications of each one of them in smart clothing. It is expected that these results provide bases for further research on WEEE from smart clothing, as well as verification and validation of the investigated heuristics.*

**Keywords:** *smart clothing; electronic waste; heuristics.*



## 1. Introdução

A crescente introdução de novas tecnologias digitais tem repercutido em alterações em estilos de vida e profundas inovações em modelos de negócio. Sob a perspectiva do desenvolvimento sustentável, os novos produtos e serviços associados a estas novas, têm oferecido novas oportunidades em temas como inovação social, gestão do ciclo de vida e economia verde. Ao mesmo tempo, há evidentes ameaças latentes à sustentabilidade em temas como o número de materiais escassos e tóxicos, o consumo de energia e a redução da participação de atores locais no valor ofertado por produtos/serviços. Um dos setores que começa a ser impactado por esta transformação é o setor do vestuário (Gurova *et al.*, 2020). No presente artigo, o tema é debatido sob a perspectiva do *smart clothing* (vestuário inteligente).

Tecnologias digitais emergentes, aplicadas a produtos do setor do vestuário, possibilitam ampliar as funções providas pelos artefatos para além da proteção física, conforto e questões estético-culturais. Para além dos impactos na interface direta usuário-vestuário, estas tecnologias possibilitam incluir funções de natureza remota, como o monitoramento de condições de saúde e de segurança, otimização da comunicação e geolocalização, expansão de experiências sensoriais e interatividade com o mundo externo e outros artefatos (Jiang *et al.*, 2021).

A produção de *smart clothing* exige que novos dispositivos estejam inseridos nas roupas ou nos tecidos e materiais que a compõem. Estes dispositivos, também chamados de hardwares, podem ser sensores, fios, baterias, luzes de LED, condutores entre outros materiais eletrônicos e não têxteis (Singha *et al.*, 2019; Jiang *et al.*, 2021). Estes novos componentes implicam na integração de novos materiais, muitos destes tóxicos ou escassos. Desta forma, apesar de haver uma perspectiva amplamente positiva e otimista acerca dos impactos das inovações pautadas pelas tecnologias digitais no âmbito do setor do vestuário, há a necessidade de reflexão crítica para se evitar potenciais efeitos colaterais sob a perspectiva da sustentabilidade. De fato, é necessário reconhecer que a incorporação de novas funções, por meio de tecnologias digitais no vestuário, também implica em impactos socioambientais e econômicos potencialmente negativos, muitas vezes difíceis de mensurar (Kohler, 2013; Lee *et al.*, 2016; Gurova *et al.*, 2020).

Dentre os diversos problemas socioambientais que a indústria da moda enfrenta de forma permanente, destaca-se a alta geração de resíduos têxteis e a gestão deste material pós-industrial e pós uso (Fletcher; Grose, 2011). Este problema tem sua complexidade agravada quando são incorporados materiais eletrônicos e hardwares não têxteis nas roupas (Kohler, 2013). Este contexto traz a perspectiva de um novo tipo de resíduo no setor: o *e-waste*, ou resíduo de equipamento eletroeletrônico (REEE).

Dentro da perspectiva apresentada, o presente artigo parte da seguinte questão: “Como o design para a sustentabilidade pode contribuir com a mitigação dos impactos ambientais de *e-waste* provenientes de *smart clothing*?”. Para tanto, objetivou-se identificar, na literatura, os principais conceitos, ênfases e desafios de sustentabilidade em *smart clothing*, assim como relacionar as especificidades deste tipo de produto com heurísticas já existentes em design para sustentabilidade, com foco na extensão do ciclo de vida dos materiais presentes no *e-waste*. Tal ênfase leva em conta a presença de materiais escassos e tóxicos ainda fortemente presentes nestes resíduos.



## 2. *Smart clothing* e suas Implicações para a Sustentabilidade

### 2.1. Definindo o Conceito de *Smart clothing*

O conceito de *smart clothing*, ou roupas inteligentes, é caracterizado por incorporar componentes eletrônicos nos tecidos e nas peças, como forma de coletar e processar dados sobre condições e reações do usuário e do ambiente em que está inserido e se conectar com outros artefatos e atores à sua volta, visando a facilitar as atividades diárias do usuário e melhorar sua qualidade de vida (Jiang et al 2021). Este conceito surge dentro do estudo de tecnologias *wearables*, ou vestíveis e corresponde à aplicação de dispositivos computacionais portáteis em produtos que são colocados sobre o corpo ou outros artefatos, com a finalidade de favorecer a relação humano-computador e integrar ainda mais as atividades cotidianas com as possibilidades do mundo digital (Lee et al., 2016). Para Jamal e Kapoor (2021), o vestuário é uma plataforma ideal para a incorporação de tecnologias *wearables*, uma vez que são produtos com amplo contato com o corpo, possibilitando o melhor funcionamento dos sensores e por serem produtos que já fazem parte do dia a dia das pessoas.

Apesar da utilização do termo *smart*, ou inteligente na língua portuguesa, para se referir a este tipo de produto, de acordo com Rokonzaman et al. (2022) não há consenso na literatura quanto à sua aplicação correta na denominação de um artefato que possua benefícios além de sua função principal. Para o autor, isso ocorre por conta da multidimensionalidade do termo, que envolve vários fatores de percepção, objetivos e subjetivos, quanto à inteligência dos artefatos e por conta do tempo recente de discussão do tema na literatura.

Jiang et al. (2021) identifica cinco níveis de inteligência em *smart clothing*: o primeiro deles envolvendo benefícios adicionais aos tecidos como bloqueador de odor e proteção UV; o segundo nível se relaciona com inovações nas propriedades físicas do tecido utilizado; terceiro nível representa roupas equipadas com microssistemas eletrônicos, porém não incorporados diretamente na construção do tecido; o quarto nível descreve-se como a integração direta da peça com dispositivos eletrônicos, mas sem comunicação com outros artefatos e, por fim, o quinto nível representa as roupas que possuem integração com dispositivos eletrônicos na construção da peça e do tecido e possuem capacidade de comunicação com outros artefatos.

O desenvolvimento de tecnologias como *Internet of Things* (IoT), Inteligência Artificial, *big data*, *blockchain*, entre outras tecnologias de processamento de dados e comunicação, permite que sejam criados produtos de *smart clothing* com diversas funcionalidades e em diversas áreas de aplicação (Fernández-Caramés e Fraga-Lamas, 2018). Lee et al. (2016) identifica três níveis de benefícios de *smart clothing*, assim como outras tecnologias *wearables*, sendo elas, a melhoria da qualidade de vida individual, possibilidade de impacto social e benefícios de interesse público. A seção seguinte apresenta exemplos de aplicação do conceito *Smart clothing*.

Apesar de reconhecer a discussão ainda existente sobre os requisitos para caracterizar um objeto como inteligente, este artigo busca tratar dos níveis 3, 4 e 5 de *smart clothing* de Jiang et al. (2021), pois são os níveis em que há componentes eletrônicos presentes nas roupas, já que esta pesquisa possui, como foco, o *e-waste* no setor do vestuário. Além disso, apesar de ser um trabalho redigido em língua portuguesa, utiliza-se aqui o termo *smart clothing* em inglês, por se tratar do idioma em que o termo foi cunhado e por conta da discussão sobre a própria definição

do conceito e adequação do termo *smart* para se referir a objetos, que pode se tornar ainda mais complexa quando traduzidos os termos.

## 2.2. Exemplos de Aplicação do *Smart clothing*

Há uma maior presença do *Smart clothing* no âmbito do setor da saúde. Um exemplo é o sutiã Palpreast, desenvolvido com foco em detectar, de forma precoce, nódulos nas mamas e contribuir com o diagnóstico e tratamento em estágio inicial da doença. Atua, desta forma, na redução da chance de mortalidade por câncer de mama. Este sutiã possui sensores e mecanismo de pressão que simula o movimento das mãos durante o autoexame, visando a identificar saliências e anormalidades nos seios (Arcarisi *et al.*, 2019). Outro exemplo, no setor de saúde, é a calça Nadi X, disponível no mercado pela empresa Wearable X, desenvolvida com a finalidade de guiar a prática de yoga sem que seja necessário comparecer em uma aula, possibilitando a prática de forma solo. O produto se conecta com o celular do usuário por meio de tecnologia *bluetooth* para personalização da prática de yoga em um aplicativo da empresa e a calça possui sensores em toda sua extensão para monitorar os movimentos e fornecer orientação por meio de áudio e vibrações nos quadris, joelhos e tornozelos, de acordo com o treino selecionado no aplicativo (Wearable Experiment, 2021).

No nível de *smart clothing* para impacto social, destacam-se produtos que se comunicam com o entorno e monitoram pessoas em situações de risco, como por exemplo bombeiros, policiais e militares. Já no nível de interesse público, incluem-se soluções em *smart clothing* para pessoas em vulnerabilidade social, como monitoramento de crianças em regiões de subnutrição, destacando, aqui, a necessidade de tecnologias de baixo custo e viabilidade econômica para o determinado contexto (Lee *et al.*, 2016). Com a integração do IoT no vestuário, tem-se a possibilidade da comunicação não somente entre o vestuário e o ser humano, mas também, entre o vestuário e outros artefatos, o que amplia as possibilidades de contribuição à segurança (ex: vestuário de uma criança “dialogando” com o semáforo em situações de perigo) (Jiang *et al.* 2021).

## 2.3. Resíduo Eletrônico gerado a partir de *Smart clothing*

Embora se tratem de produtos com potencial de proporcionar diversos benefícios ao usuário e à sociedade, o desenvolvimento de *smart clothing*, sem considerar aspectos de sustentabilidade, pode resultar em efeitos colaterais e impactos ambientais provenientes de todo o ciclo de vida do produto, desde a intensificação da extração de recursos naturais até o acúmulo de resíduo. Uma das preocupações existentes com relação a esse tipo de produto é a perspectiva de um novo tipo de resíduo no setor do vestuário: o *e-waste*, ou resíduo de equipamento eletroeletrônico (REEE) (Kohler, 2013).

Todos os equipamentos eletroeletrônicos que são descartados pelo usuário, para os quais não há intenção de reuso, caracterizam-se como *e-waste*, ou REEE. Fatores como falta de demanda de uso e ausência de operação do equipamento por falta de demanda ou possibilidade de reparo fazem com que estes produtos estejam no final do seu ciclo de vida (UNEP, 2007; Dias, 2018; Srivastav *et al.*, 2023). Os REEE apresentam-se como resíduos nocivos e perigosos para o ecossistema e para a saúde humana por possuírem metais como chumbo, mercúrio, cádmio, cromo, entre outros (Awasthi *et al.* 2016; Zeng *et al.* 2013; Zhang *et al.* 2012; Brasil, 2010).

A combinação de roupas e tecidos com componentes eletrônicos intensifica a complexidade da gestão de resíduos, tanto do setor de equipamentos eletroeletrônicos (EEE), quanto da moda e vestuário. Além disso, a própria motivação de descarte ganha novos fatores que podem acelerar a decisão do usuário por se desfazer do produto, como obsolescência técnica e funcional da tecnologia, além da obsolescência estética e do estado de conservação do tecido convencional (Kohler, 2013).

Por serem produtos com tecnologias recentes e ainda não ofertadas de forma ampla no mercado, as *smart clothes* não são incluídas como um tipo específico de REEE nas classificações de resíduos e protocolos de gestão de REEE, como por exemplo na Diretiva 2012/19/UE da Comunidade Econômica Europeia, que divide os REEE em 10 categorias (EU, 2012). Apesar disso, é importante compreender os tipos de resíduos eletroeletrônicos que podem ser gerados por *smart clothing*. Para isso, Jiang *et al.* (2021), com base em Mattila (2001), compreende o nível de integração das roupas com eletrônicos como uma possível classificação de *smart clothing*. Para este autor, o menor nível de integração é a aplicação por meio de encaixe de grampos e cliques rígidos que contenham dispositivos eletrônicos. Em seguida, o autor apresenta a fixação por meio de magnetismo ou velcros dos grampos e cliques rígidos. Em terceiro, os eletrônicos flexíveis são posicionados sobre o tecido ou roupa. No quarto nível, os eletrônicos flexíveis são costurados sobre as peças e tecidos, diferentemente do último nível, no qual os componentes eletrônicos, como sensores e condutores, são incorporados na construção do tecido utilizado para fazer a peça, podendo ter alguns dispositivos estratégicos apenas posicionados sobre o tecido, como fontes de energia (Jiang *et al.*, 2021).

Ao passo que o nível de integração dos dispositivos eletrônicos na roupa aumenta, a dificuldade de gerenciamento do produto e possíveis resíduos em seu fim de vida também aumenta, pois em altos níveis de integração as estratégias de extensão do ciclo de vida precisam ser adequadas tanto ao material têxtil quanto ao REEE. Desta forma, a investigação específica em *smart clothing* e a geração de e-waste se faz pertinente.

#### **2.4. *Smart clothing* e Design para Sustentabilidade**

O desenvolvimento de produtos por meio do design para a sustentabilidade, necessariamente, requer uma perspectiva de ciclo de vida, passando pelas etapas de pré-produção, produção, uso e fim de vida (Sampaio *et al.*, 2018). No contexto da sustentabilidade ambiental, uma das contribuições possíveis do design encontra-se, justamente, na possibilidade de projetar o artefato, considerando todo o ciclo de vida, antes que ele seja produzido, ou seja, há possibilidade de prever o impacto do produto antes que ele exista (Lewis *et al.*, 2001). Ao prever os impactos do produto em cada aspecto que demanda uma tomada de decisão, como por exemplo, seleção de materiais, processos e performance final, é possível aplicar, ainda na etapa conceitual, estratégias que contornem cada um dos impactos e que tornem o produto mais adequado e com melhores indicadores ambientais (Lewis *et al.*, 2001).

De acordo com UNEP (2014), a proposta da hierarquia de gestão de resíduos de Pollution Probe Foundation, da década de 70, continua sendo um modelo de referência na definição de estratégias para tomada de decisão relacionada aos resíduos sólidos. O modelo é baseado em quatro Rs, reduzir, reutilizar, reciclar e recuperar, nesta ordem de prioridade com relação ao potencial de redução de impactos ambientais. De acordo com esse modelo, a prevenção é o

caminho mais adequado para a sustentabilidade, no qual, não produzir e não gerar resíduos é prioridade, incluindo estratégias como miniaturização, digitalização e servitização. Apesar disso, existem situações em que o produto se faz necessário e precisa ser desenvolvido e produzido. Desta forma, quando a prevenção não é possível, é importante aplicar outras estratégias de sustentabilidade de acordo com os próximos níveis do modelo dos quatro Rs.

Dentro das estratégias existentes para o desenvolvimento de artefatos intrinsecamente mais sustentáveis (Manzini; Vezzoli, 2005; Santos, 2009), este artigo possui, como foco, as soluções voltadas para o fim de vida do produto, como extensão do ciclo de vida por meio de reuso, reparo e viabilização da reciclagem.

Para explorar formas de facilitar o reuso, reparo e reciclagem, ainda na etapa conceitual de design de *smart clothing*, este artigo tem também como foco, a exploração de heurísticas para o desenvolvimento de produto. Para isso, o estudo parte do entendimento de conceitos, princípios e heurísticas, sendo que o conceito possui um nível de abstração mais elevado e heurística uma abstração menor. O conceito principal que guia essa pesquisa é o de Economia Circular, definido por ser um sistema no qual os materiais não se tornam resíduos e a natureza é regenerada, diferente da Economia Linear, que propõe a extração, produção, uso e descarte. Neste modelo, os produtos e materiais são mantidos em circulação através de processos como manutenção, reutilização, renovação, refabricação, reciclagem e compostagem (Ellen MacArthur Foundation, 2016).

Já os princípios relacionam-se com a viabilização do reuso, reparo e reciclagem, especificamente, como forma de extensão do ciclo de vida de *smart clothing*. Os princípios norteadores foram baseados em Lewis *et al.* (2001), Manzini e Vezzoli (2005) e Sampaio *et al.* (2018), sendo eles: minimização de resíduos, facilitar a montagem e desmontagem, otimizar o ciclo de vida dos produtos, estender o ciclo de vida dos materiais e facilitar o reuso, reparo e remanufatura.

### 3. Método de pesquisa

O presente artigo possui abordagem qualitativa, caráter exploratório-descritivo e natureza básica. Inicialmente, foi realizada uma revisão bibliográfica assistemática (RBA), a fim de reunir informações preliminares para formulação do problema de pesquisa e identificar temas relevantes e palavras-chave para a próxima etapa, de revisão bibliográfica sistemática (RBS). A RBS foi realizada como forma de levantar dados e analisar, de forma crítica, a literatura existente sobre o tema, com o foco em identificar ênfases e conceitos principais envolvidos.

Durante a RBA, foi realizada busca nas bases de dados da Biblioteca Digital Brasileira de Teses e Dissertações, Periódicos CAPES e Google Scholar, em publicações feitas de 2013 a 2023, com foco em analisar a densidade e evolução de estudos na literatura sobre *smart clothing*, *e-waste*, estratégias de design para sustentabilidade, gestão do fim de vida do produto e áreas correlatas que se fizeram pertinentes neste estudo. Esta etapa teve, como objetivo, obter maior compreensão dos construtos envolvidos, relação entre eles e identificação de principais termos e autores. A partir dos trabalhos encontrados nesta etapa, realizou-se busca cruzada, com base em Conforto, Amaral e Silva (2011), para rastrear outras pesquisas relevantes com base nas citações dos autores.



A RBS foi conduzida utilizando-se o protocolo proposto por Conforto, Amaral e Silva (2011). Esta etapa teve, como foco, compreender o estado da arte sobre *smart clothing* e estratégias de design para sustentabilidade com base no fim de vida do produto. O protocolo de busca foi desenvolvido fundamentando-se na questão “qual o estado da arte de *smart clothing* e e-waste proveniente de produtos de vestuário com tecnologias?”. O período de busca foi de 2018 a 2023, sendo que as buscas foram realizadas nas plataformas Google Scholar e Periódicos CAPES. As palavras-chave, a partir das quais foram gerados as *strings* de busca, foram: *electronic devices, electronic components, heuristics, strategies, e-waste, sustainability, clothing, fashion, garment, end-of-life, waste, wearables* e *smart clothing*. O âmbito da pesquisa foi o dos periódicos internacionais revisados por pares e produzidos na língua inglesa, sendo que, para consideração no filtro 01 (título/resumo), foram considerados os 30 primeiros resultados em ordem de relevância, a partir da aplicação das *strings* de busca. Como critérios de exclusão, considerou-se a presença dos termos: *material engineering, operational processes, digital fashion, business models* e outros termos não correlatos ao design. As heurísticas propostas neste artigo, foram desenvolvidas tendo como estrutura teórica-base, as proposições de Lewis *et al.* (2001), Manzini e Vezzoli (2005) e Sampaio *et al.* (2018). Os autores em questão foram selecionados tendo como parâmetro o número de citações no campo. Como as proposições destes autores tratam-se de heurísticas genéricas de design para sustentabilidade e não específicas para *smart clothing*, foi realizada a transposição para o tema específico do *smart clothing*. O agrupamento das heurísticas foi baseado nos Rs da sustentabilidade de Pollution Probe Foundation (UNEP, 2014), resultando em 3 grupos, um com foco em viabilizar o reuso, outro o reparo e, por fim, a reciclagem.

#### 4. Resultados e análise

Sob a perspectiva dos resíduos pós-consumo, de acordo com a Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei Nº 12.305 de 2010), a reutilização é o processo no qual não se deve demandar transformação biológica, física ou físico-química dos resíduos. Sob a perspectiva de produtos, componentes e subsistemas destes produtos, a reutilização implica na reintrodução dos mesmos em contextos de uso, mantendo ou não sua função original. Para compreender como as heurísticas de reuso podem impactar na extensão do ciclo de vida dos materiais associados a *smart clothing* e quais as implicações para o seu desenvolvimento, foi desenvolvido o quadro 1, como forma de analisar individualmente cada heurística genérica proposta pelos autores e quais as relações com o vestuário com dispositivos eletrônicos.

| Heurística (reuso)  | Implicações para <i>smart clothing</i>  |
|---|---|
| Intensifica a utilização  | Propõe peças multifuncionais com mecanismos de personalização, como acabamento dupla-face e partes ajustáveis para diferentes configurações estéticas e formais; enfatiza soluções orientadas à economia do compartilhamento; também contempla as peças do vestuário que possibilitam o “faça-você-mesmo”, permitindo fácil adequação a novos usos. |
| Produtos reconfiguráveis para a adaptação em relação à evolução física dos indivíduos | Utilização de recursos de modelagem que permitam expansão e contração do produto como modularidade, nescas, plissados e pregas, junto com recursos para manter o ajuste do tamanho como amarrações, cintos, faixas, encaixes, botões e zíperes.   |
| Produtos modulares para a   | Divisão do produto em partes estratégicas de acordo com a sua modelagem   |



|   |   |
|---|---|
| adaptação em relação à evolução cultural dos indivíduos   | possibilitando a mudança da configuração estética ao rearranjar os módulos mesmo após a fabricação da peça.   |
| Facilita o acesso às partes que devem ser limpas  | Optar por tecidos eletrônicos laváveis e possibilitar a remoção de partes que não podem ser lavadas.  |
| As partes e componentes são estandardizados e projeta a reutilização de partes auxiliares                     | Incorporar os componentes eletrônicos de forma padronizada e intercambiável entre as roupas favorecendo o reuso das partes.   |
| Prevê um segundo uso  | Possibilitar a remoção dos componentes eletrônicos para o reuso da peça como roupa convencional.  |
| Facilita a remodelação  | Possibilitar a atualização estética do produto por meio de partes removíveis ou tecnologias de mudança de cores e texturas.   |
| Subdivide o produto em subconjuntos que possam ser facilmente separados e manipulados como partes individuais | Centralizar os componentes eletrônicos em parte da roupa com menor chance de danificação, para que possa ser removida e reutilizada em outras peças quando necessário e/ou quando o restante da roupa estiver danificado. |

**Quadro 1** – Heurísticas com foco no reuso como estratégia de fim de vida do *smart clothing*. Fonte: Autores com base em Lewis *et al.* (2001), Manzini e Vezzoli (2005) e Sampaio *et al.* (2018).

Por sua vez, o reparo está relacionado com reparar, reformar, consertar, recondicionar ou restaurar, buscando a extensão da vida útil do produto, ao restabelecer a sua funcionalidade total ou parcial ou ao renovar sua estética. O reparo pode ser realizado pelo próprio usuário, por outros usuários para os quais o produto foi repassado, ou por empresas especializadas (UK Government, 2021; Ali; Shirazi, 2023).

Esta estratégia relaciona-se com o conceito de “direito ao reparo”, ou “*right to repair*” na língua em que o termo foi cunhado e envolve soluções que garantam que o usuário seja capaz de consertar seus equipamentos eletroeletrônicos, ao ter acesso a informações, ferramentas, softwares, componentes e peças do produto (UK Government, 2021; Ali; Shirazi, 2023). Por ser um conceito que surgiu a partir da demanda de manutenção de equipamento eletroeletrônico (EEE), a investigação em reparabilidade de *smart clothing* pode incluir soluções que surgiram por meio desse conceito, uma vez que possui componentes eletrônicos e similaridades técnicas e funcionais com outros tipos de EEE. As heurísticas genéricas com foco no reparo e suas implicações para *smart clothing* encontram-se no Quadro 2.

| Heurística (reparo)  | Implicações para <i>smart clothing</i>   |
|--|--|
| Facilita a atualização e a adaptabilidade                                      | Aplicar tecnologias com possibilidade de atualização do sistema operacional e de componentes estratégicos na peça.                   |
| Facilita a manutenção  | Disponibilizar informações e componentes para reparo dos dispositivos eletrônicos incorporados nas roupas.                           |
| Vidas iguais para os vários componentes  | Utilizar tecidos com vida útil compatível com o tempo de vida dos dispositivos eletrônicos.  |
| Predispõe e facilita a substituição, para a atualização das partes de software | Centralizar o controle do sistema operacional em um componente que possa ser facilmente removido da roupa para reparo e atualização. |



|   |  |
|---|--|
| Evita materiais permanentes para funções temporárias                                      | Possibilitar a remoção de dispositivo que garante a funcionalidade da roupa em casos de demandas temporárias para reuso em outras roupas.  |
| Busca facilitar a atualização no próprio lugar de uso                                     | Fornecer informações, instrumentos e componentes para facilitar o reparo e adaptabilidade por parte do usuário. Explorar interferências têxteis como estampas que indiquem as instruções de reparo de partes que possam danificar com mais facilidade.           |
| Facilita a substituição, para a atualização das partes de <i>hardware</i>                 | Prever possibilidade de atualização da tecnologia por meio da troca de partes do <i>hardware</i> , priorizando a incorporação do dispositivo na peça por meio de encaixe, de forma que não seja necessário descosturar e costurar o componente na peça.          |
| Projeta partes e componentes padronizados   | Incorporar os componentes eletrônicos de forma padronizada e intercambiável entre as roupas favorecendo o reuso das partes e reduzindo a complexidade do reparo.   |
| Predispõe e facilita a remoção e retorno das partes do produto que estão sujeitas a danos | Incorporar os dispositivos eletrônicos com maior propensão a danificar em aviamentos como botões ou em partes estratégicas como bordados sobrepostos, de forma que possam ser removidos e trocados com facilidade.   |
| Fornecer junto com o produto, instrumentos, materiais e informações para seu reparo       | Fornecer partes para reparo do produto, como componentes eletrônicos com maior propensão a danificar.  |
| Produtos multifuncionais com componentes comuns e substituíveis                           | Utilizar componentes semelhantes em roupas diferentes para garantir que possam ser reutilizados no reparo dos produtos.  |
| Torna desmontáveis principalmente as partes mais sujeitas a desgaste e/ou quebras         | Possibilitar a troca de partes da roupa como mangas, capuz, barrados, entre outras partes da modelagem.  |
| Adota estruturas modulares  | Utilizar modelagem modulares associadas ao posicionamento dos dispositivos eletrônicos de forma que seja possível reconfigurar e reparar apenas partes do produto, explorando amarrações, encaixes, sobreposições e junção por aviamentos como zíperes e botões. |
| Procura a máxima linearidade no direcionamento de desmontagem                             | Utilizar interferências têxteis como forma de sinalizar a ordem de desmontagem do produto para reparo.   |
| Minimiza os tipos de fixação que necessitam instrumentos diferenciados para remoção       | Padronizar a forma de incorporação dos dispositivos nas roupas, para que todos os dispositivos tenham formas de desmontagem e remoção semelhantes.   |

**Quadro 2** – Heurísticas com foco no reparo como estratégia de fim de vida do smart clothing. Fonte: Autores com base em Lewis *et al.* (2001), Manzini e Vezzoli (2005) e Sampaio *et al.* (2018).

De acordo com a hierarquia de ações em resíduos sólidos, a reciclagem vem depois do reuso e reparo (UNEP, 2007a; UNEP, 2007b). Apesar de não ser prioridade dentre as opções de estratégias de extensão do ciclo de vida, é necessário considerar como uma possibilidade, uma vez que existe o risco de um produto não ter condições de reuso ou reparo. A reciclagem é caracterizada pela segregação e processamento de resíduos visando retornar os materiais à cadeia produtiva, reduzindo a demanda por matéria-prima virgem (Foelster *et al.*, 2016; Dias *et al.*, 2018), contribuindo com a promoção da economia circular, ao manter os materiais e seu valor econômico no ciclo de produção e utilização (Gharfalkar *et al.*, 2016). Para investigar as implicações das heurísticas, com foco na reciclagem e no desenvolvimento de *smart clothing*, foi desenvolvido o Quadro 3.

| Heurística (reciclagem)  | Implicações para <i>smart clothing</i>  |
|--|---|
| Reciclagem em efeito cascata   | Prever fases de reciclagem para os tecidos e componentes eletrônicos utilizados.                              |
| Identificação dos materiais  | Utilizar interferências têxteis como estampas para identificar os materiais.                                  |
| Minimiza o nº de materiais incompatíveis entre si  | Evitar incorporar os componentes eletrônicos diretamente na fibra têxtil de forma que não dê para remover.    |
| Facilita a separação dos materiais incompatíveis entre si  | Possibilitar a separação dos componentes eletrônicos dos materiais têxteis e aviamentos.                      |
| Facilita a limpeza   | Utilizar componentes eletrônicos que possam ser lavados junto com a roupa.                                    |
| Minimiza e facilita as operações para desmontagem e separação  | Utilizar interferências têxteis como estampas para identificar as etapas de desmontagem da peça.              |
| Fornecer ao usuário informações sobre como descartar-se do produto   | Incluir na roupa (etiqueta ou estampa) ou no software de operação do produto instruções de descarte.          |
| Fornecer informações complementares sobre a idade do material, o nº de reciclagens já efetuadas e os aditivos utilizados | Incluir no software de operação informações sobre a reciclabilidade dos materiais daquele produto específico. |
| Em estruturas modulares, usar materiais homogêneos, com diferentes processos de transformação                            | Quando utilizado uma modelagem modular, separar os tipos de componentes eletrônicos por módulos.              |
| Torna desmontáveis principalmente os componentes e os materiais tóxicos e nocivos  | Facilitar a remoção de fontes de energia como baterias.   |
| Torna desmontáveis principalmente as partes ou os materiais de maior valor econômico                                     | Facilitar a remoção de componentes eletrônicos que possuam metais de alto valor econômico.                    |

**Quadro 3** – Heurísticas com foco na reciclagem como estratégia de fim de vida do *smart clothing*. Fonte: Autores com base em Lewis *et al.* (2001), Manzini e Vezzoli (2005) e Sampaio *et al.* (2018).

O processo de revisão bibliográfica, levantamento das heurísticas e análise das proposições de implicações para *smart clothing* resultaram em discussões para avanços nas pesquisas do tema, apresentados na próxima seção deste artigo.

## 5. Discussão

O desenvolvimento de *smart clothing* difere do desenvolvimento de vestuário convencional, pois além de projetar com todos os requisitos básicos de roupas comuns, como usabilidade, configuração estético-formal e necessidades do usuário, a incorporação de tecnologias implica na compreensão de aspectos específicos de *software* e *hardware*, como questões técnicas e de funcionamento dos dispositivos, e também das formas de unir ao vestuário (Kohler, 2013). Quando inserida a questão da sustentabilidade ambiental desse tipo de produto, o desafio torna-se ainda maior. Desta forma, destaca-se aqui, a importância de investigar heurísticas e proposições práticas que facilitem a atuação do designer de moda. As proposições de heurísticas aqui analisadas e investigação de implicações para o vestuário, podem vir a ser consolidadas após etapa de verificação e validação em pesquisa posterior.

De maneira geral, ao propor implicações para *smart clothing*, a partir das heurísticas gerais levantadas, foi possível identificar a necessidade de compreensão mais ampla sobre os dispositivos eletrônicos por parte do designer, uma vez que a aplicação das heurísticas gerais e suas implicações em *smart clothing* depende, também, das características técnicas dos componentes e da configuração da roupa a ser produzida. Desta forma, é possível identificar a necessidade de desenvolvimento de novas competências no designer de moda, além dos conhecimentos específicos do vestuário convencional.

Já na análise de heurísticas específicas para viabilizar o reparo e posterior levantamento de proposições de implicações para *smart clothing* (como o fornecimento de instrumentos, componentes e informações sobre montagem e desmontagem) demonstrou que sua aplicação demanda adaptação na forma em que as empresas de vestuário costumam se relacionar com os clientes. É necessário também mudança no paradigma convencional do mercado, que visa comercializar produtos novos. No caso de viabilização do reparo, é importante que o fabricante e/ou varejista tenha atenção ao pós-venda, principalmente nos casos em que as peças para troca e adaptação do produto não forem disponibilizadas no momento da sua aquisição. Neste caso, também foi identificada a possibilidade de fornecer serviços que contribuam com a extensão do ciclo de vida, como upgrade e atualização de software e espaços específicos para reparo e customização dentro das lojas.

Apesar da implementação de serviços específicos para reparo ser uma estratégia importante, tais ações apresentam-se como desafios dentro do sistema complexo do setor de EEE e do vestuário, por possuir diversos atores, com diferentes relações entre eles e infraestrutura já estabelecida seguindo o paradigma de priorizar o fornecimento de produtos novos (Sampaio *et al.*, 2018). Desta forma, é importante aprofundar a investigação em sistemas e serviços a fim de favorecer a extensão do ciclo de vida de *smart clothing*, juntamente com a avaliação das heurísticas de desenvolvimento de produto.

Por fim, a atribuição de tecnologias de comunicação ao vestuário, como IoT, faz com que os impactos gerados pelo produto não se limitem ao produto em si, como no caso de roupas comuns, pois é necessário considerar os dispositivos externos que são necessários para o funcionamento da tecnologia utilizada. Estes equipamentos atrelados ao produto, como processadores de dados externos, podem, inclusive, estar instalados em regiões distantes do local de uso do produto. Desta forma, para que o produto seja realmente ecoeficiente, é necessário avaliar, também, os impactos destes dispositivos externos que fazem com que o produto funcione, principalmente, com relação ao seu gasto de energia, para um funcionamento correto e seu descarte.

## 6. Considerações Finais

As heurísticas voltadas ao reuso, no âmbito do artefato, ampliam a facilidade de extensão do ciclo de vida (Manzini e Vezzoli, 2005), porém a combinação com sistemas de apoio ao repasse e reutilização, tanto do produto quanto de partes, pode favorecer a efetivação do reuso (Sampaio *et al.*, 2018). São exemplos, as lojas de segunda mão, banco de partes de EEE para reuso e esquemas de troca. Portanto, entende-se que o design de sistemas produto+serviço faz-se necessário para se alcançar a plena efetividade de soluções orientadas ao final do ciclo de



vida de *smart clothing*. Associado a esta questão, está o desafio de se alcançar a viabilidade econômico-financeira de uma gestão do resíduo eletroeletrônico presente no *smart clothing*, uma vez que essas peças possuem pouca massa de componentes eletrônicos por produto de componentes eletrônicos quando comparadas a outros tipos de EEE.

Com esta pesquisa, foi possível compreender que é possível pautar-se nas heurísticas de desenvolvimento de produto com foco na extensão do ciclo de vida já consolidadas na literatura de design para sustentabilidade, para investigar possibilidades de mitigação dos impactos do e-waste, provenientes de *smart clothing*. As tabelas resultantes podem servir de base para explorações futuras mais aprofundadas e com aplicações práticas para validação e refinamento das proposições aqui descritas.

Além das heurísticas para extensão de ciclo de vida do produto, a investigação sobre motivações do usuário ao descartar *smart clothing* e formas de o evitar, também se relaciona com a gestão de e-waste na moda e caracteriza-se como uma necessidade de estudo futuro. Reconhece-se, também, a necessidade de explorar soluções sistêmicas e não apenas isoladas, como forma de prevenir o efeito rebote, como por exemplo, o aumento do consumo do produto e aplicações desnecessárias da tecnologia e a ineficácia das ações propostas.

Apesar do enfoque deste artigo estar no fim de vida de *smart clothing*, reconhece-se que, para um produto ser ambientalmente mais adequado, é necessário contemplar as outras estratégias de design para sustentabilidade que consideram todo o ciclo de vida do produto, inclusive em relação à prevenção de resíduos durante a etapa de manufatura. No entanto, por conta de definição de escopo para pesquisa mais detalhada, definiu-se o recorte proposto. Também, compreende-se que é importante que as soluções não se restrinjam à dimensão ambiental da sustentabilidade, mas que abordem as dimensões sociais e econômicas, como forma de se ter uma visão holística da sustentabilidade, uma vez que ambos os setores - vestuário e eletroeletrônico - já enfrentam desafios de cunho socioeconômico, principalmente, com relação às condições de trabalho, exposição à substâncias tóxicas e centralização da produção.

## Referências

ALI, S., SHIRAZI, F. The Paradigm of Circular Economy and an Effective Electronic Waste Management. **Sustainability**, v. 15, n. 3, 1998. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su15031998>. Acesso em: 15 jul. 2023.

ARCARISI *et al.* Palpreast: A New Wearable Device for Breast Self-Examination. **Applied Sciences**. v. 9, n. 3, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/app9030381>. Acesso em: 15 ago. 2023.

AWASTHI, A. K.; ZENG, X.; LI, J. Environmental pollution of electronic waste recycling in India: A critical review. **Environmental Pollution**, v. 211, n. 1, p. 259–270, abr. 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0269749115301871>.

BRASIL. Lei 12.305, de 02 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**. Brasília, DF, 03 ago. 2010.



- CONFORTO, E. C.; AMARAL, D. C.; SILVA, S. L. DA. Roteiro para revisão bibliográfica sistemática: aplicação no desenvolvimento de produtos e gerenciamento de projetos. *In: 8º Congresso Brasileiro de Gestão de Desenvolvimento de Produto*. Porto Alegre, 2011.
- DIAS, P., MACHADO, A., HUDA, N., BERNARDES, A. M. Waste electric and electronic equipment (WEEE) management: A study on the Brazilian recycling routes. **Journal of Cleaner Production**, v. 174, p. 7–16, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.219>. Acesso em: 20 jul. 2023.
- FERNÁNDEZ-CARAMÉS, T.; FRAGA-LAMAS, P. Towards The Internet-of-Smart-Clothing: A Review on IoT Wearables and Garments for Creating Intelligent Connected E-Textiles. **Electronics**, v. 7, n. 12, p. 405, 2018. MDPI AG. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.3390/electronics7120405>. Acesso em: 20 jul. 2023.
- FLETCHER, K., GROSE, L. **Moda & sustentabilidade: design para mudança**. 1. ed. São Paulo: SENAC, 2012.
- FOELSTER, A. S., ANDREW, S., KROEGER, L., BOHR, P., DETTMER, T., BOEHME, S., Herrmann, C., . Electronics recycling as an energy efficiency measure and Life Cycle Assessment (LCA) study on refrigerator recycling in Brazil. **Journal of Cleaner Production**, v. 129, p. 30-42, ago. 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.04.126>.
- FOUNDATION, E. M. **Circular Design For Fashion**. [s.l.]: Thames Hudson, 2022.
- GHARFALKAR, M., COURT, R., CAMPBELL, C., ALI, Z., HILLIER, G. Analysis of waste hierarchy in the European waste directive 2008/98/EC. **Waste Management**, v. 39, p. 305-313, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.02.007>. Acesso em: 20 jul. 2023.
- GUROVA, O., MERRITT, T. R., PAPACHRISTOS, E., VAAJAKARI, J. Sustainable solutions for wearable technologies: mapping the product development life cycle. **Sustainability**, v. 12, n. 20, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su12208444>. Acesso em: 12 mai. 2023.
- JAMAL, F., KAPOOR, V. *Smart clothing* and Wearables: a review of fashion technology. **The IUP Journal of Brand Management**, v. 19, n. 4, 2020. Disponível em: <https://www.innovationintextiles.com/new-report-smart-textiles-and-wearables-markets-applications-and-tech->. Acesso em: 12 mai. 2023.
- JIANG, S. *et al.* Applications of *Smart clothing*: brief overview. **Communications in Development and Assembling of Textiles Products**, v. 2, p. 123-140, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.25367/cdatp.2021.2.p123-140>. Acesso em: 20 jul. 2023.
- KÖHLER, A. R. Anticipatory eco-design strategies for smart textiles: perspectives on environmental risk prevention in the development of an emerging technology. **Delft Academic Press**, 2013. Disponível em: [10.4233/uuid:850be7ae-1f9e-4b3f-b49f-242488bab216](https://doi.org/10.4233/uuid:850be7ae-1f9e-4b3f-b49f-242488bab216). Acesso em: 12 mai. 2023.
- LEE, J.; KIM, D.; RYOO, H.-Y.; SHIN, B.-S. Sustainable Wearables: Wearable Technology for Enhancing the Quality of Human Life. **Sustainability**, v. 8, n. 5, 2016. MDPI AG. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.3390/su8050466>. Acesso em: 15 jun. 2023.
- LEWIS, H.; GERTSAKIS, J.; GRANT, T.; MORELLI, N.; SWEATMAN, A. **Design + Environment: a Global Guide to Designing Greener Goods**. Sheffield: Greenleaf, 2001. 200p.
- LI, Q.; XUE, Z.; WU, Y.; ZENG, X. The Status Quo and Prospect of Sustainable Development of *Smart clothing*. **Sustainability**, v. 14, n. 2, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su14020990>. Acesso em: 20 jul. 2023.
- MANZINI, Ezio; VEZZOLI, Carlo. **O desenvolvimento de produtos sustentáveis: os requisitos ambientais dos produtos industriais**. São Paulo: Edusp, 2005.
- NADI X PANTS. Wearablex, 2023. Disponível em: <https://www.wearablex.com>. Acesso em: 20 ago. 2023.



- ROKONUZZAMAN, M. *et al.* What makes an object smart? Conceptualization, development, and validation of a scale to measure the Smartness of a Thing (SoT). **Journal of Business Research**, v. 141. p. 337-354, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2021.11.040>. Acesso em: 20 jun. 2023.
- SAMPAIO, Claudio P. *et al.* **Design para a sustentabilidade: dimensão ambiental**. Curitiba: Insight, 2018. 183 p.
- SANTOS, A. dos. Níveis de maturidade do design sustentável na dimensão ambiental. *In*: MORAES, Dijon de; KRUCKEN, Lia (Org.). **Design e sustentabilidade**. Barbacena: EdUEMG, 2009. p. 13-26.
- SINGHA, K., KUMAR, J., PANDIT, P. Research and Technology. **Memory Applications**, v. 16, 2018.
- SRIVASTAV, A. L. *et al.* Concepts of circular economy for sustainable management of electronic wastes: challenges and management options. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 30, n. 1, p. 48654–48675, fev. 2023. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11356-023-26052-y#citeas>.
- WMW. UNEP Report - Industrial Waste Management Lessons from Japan. **Waste Management World**. 2014. Disponível em: <https://waste-management-world.com/artikel/unep-report-industrial-waste-management-lessons-from-japan/>. Acesso em: 02 dez. 2023.
- UNEP United Nations Environment Protection. **E-waste volume I: inventory assessment manual**. 2007a. Disponível em: [https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/7857/EWasteManual\\_Vol1.pdf?sequence=3&isAllowed=y](https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/7857/EWasteManual_Vol1.pdf?sequence=3&isAllowed=y). Acesso em: 15 dez. 2023.
- UNEP United Nations Environment Protection. **E-waste volume II: inventory assessment manual**. 2007b. Disponível em: [https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/9801/EWasteManual\\_Vol2.pdf?sequence=3&isAllowed=y](https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/9801/EWasteManual_Vol2.pdf?sequence=3&isAllowed=y). Acesso em 15 dez. 2023.
- VEZZOLI, C. **Design de sistemas para a sustentabilidade: teoria, métodos e ferramentas para o design sustentável de “sistemas de satisfação”**. Tradução de REGO, M. A. Salvador: EDUFBA, 2010.
- ZENG, X. *et al.* Perspective of electronic waste management in China based on a legislation comparison between China and the EU. **Journal of Cleaner Production**, v. 51, n. 1, p. 80–87, jul. 2013. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S095965261200501X?via%3Dihub>.
- ZHANG, K.; SCHNOOR, J.; ZENG, E. E-waste recycling: Where does it go from here? **Environmental Science and Technology**, v. 46, n. 20, p. 10861–11484, out. 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/es303166s>.

