

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

MARISA CRISTINA MENDONÇA FUJIMOTO

POTENCIAIS USOS DE *BLOCKCHAIN* NA TRANSIÇÃO DOS PLÁSTICOS PARA A
ECONOMIA CIRCULAR

BAURU

2022

MARISA CRISTINA MENDONÇA FUJIMOTO

POTENCIAIS USOS DE *BLOCKCHAIN* NA TRANSIÇÃO DOS PLÁSTICOS PARA A
ECONOMIA CIRCULAR

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Especialização em Projetos Sustentáveis e Inovações Ambientais, do Programa de Educação Continuada em Ciências Agrárias, da Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de especialista.

Orientador: Prof. Dr. Gilberto Miller Devós Ganga

BAURU

2022

AGRADECIMENTOS

A ideia de começar essa especialização surgiu depois de uma série de crises existenciais no início da pandemia, em março de 2020. Como geralmente acontece com os projetos mirabolantes, logo deu para perceber que não era tão fácil assim encaixar mais uma tarefa no meio da vida pessoal e do trabalho (e, nos últimos dois anos, da peste).

Esse TCC é o resultado das ações de uma equipe de pessoas muito maior do que eu, e posso dizer com segurança que tenho a melhor torcida que alguém poderia pedir. Ao prof. Gilberto, agradeço a confiança em orientar uma aluna que nunca tinha conhecido, e por toda disponibilidade e atenção que teve comigo durante a elaboração desse texto. À minha família e aos amigos, fica a gratidão imensa pelas palavras de apoio e incentivo, mesmo quando vocês não entendiam muito bem dos temas que eu estava falando e nem o que isso tinha a ver com as tartarugas. Muito obrigada! Esse título é nosso.

RESUMO

Os modelos de produção atuais são majoritariamente lineares, caracterizados pelo consumo de novos recursos para fabricação de itens, que são transformados e em seguida descartados. A economia circular propõe uma visão oposta, na qual o valor presente nos materiais seja mantido em circulação pelo máximo de tempo possível, com a inserção de itens pós-consumo em outras cadeias produtivas. Esse modelo alternativo vem ganhando destaque nos últimos anos, em particular no segmento de plásticos, marcado pelos grandes volumes gerados, descarte de produtos após uso único e baixas taxas de reaproveitamento. Em paralelo, nota-se também a emergência de diversas tecnologias disruptivas relacionadas à indústria 4.0, dentre as quais a de *blockchain*. Desde seu surgimento em 2008 com a criptomoeda Bitcoin, a ferramenta vem sendo explorada em campos diversos, tais quais logística e sustentabilidade. Nesse contexto, nota-se que, apesar do interesse crescente tanto do meio acadêmico quanto corporativo por ambos os temas, há ainda uma lacuna quando se trata de possíveis sinergias e conflitos entre as duas tendências. Assim, o presente trabalho pretende contribuir para a discussão explorando a interseção entre *blockchain* e economia circular, visando entender particularmente de que formas a tecnologia poderia promover a inserção dos resíduos plásticos em ciclos fechados. A fim de construir um panorama amplo do estado atual das aplicações e compreender se estas apresentam compatibilidade com o segmento de polímeros, a metodologia escolhida para avaliação foi a de revisão bibliográfica da literatura. Com isso, foi possível elaborar analogias e sugestões que possam viabilizar estratégias que mantenham o valor dos plásticos ao longo de toda sua vida útil e reduzam impactos ambientais ligados à sua produção.

Palavras-chave: *Blockchain*, Plásticos, Economia circular, Sustentabilidade.

ABSTRACT

The present means of production are largely linear, characterized by the consumption of new resources to the manufacture of items, followed by their transformation and disposition. The circular economy proposes an opposing approach, according to which the value embedded in the materials is supposed to be kept in circulation for the longest time possible, with the insertion of post consumption residues in other productive cycles. This alternative model has gained considerable attention in the last few years, particularly in the plastics segment, so depicted by the large volumes produced, the single-use products and low reuse rates. In conjunction, the emergence of several new technologies associated with Industry 4.0 has also come to notice, such as blockchain. Since its first appearance in 2008 with the cryptocurrency Bitcoin, the tool has been tested in various sectors, namely logistics and sustainability. Yet, although both academia and the corporate sector have demonstrated growing interest in both themes, there is still a research gap considering possible synergies and conflicts between the two trends. Thus, the present study aims at contributing to the discussion by exploring the intersection between blockchain and circular economy, with the particular focus on the ways the technology could promote the maintenance of plastic residues in closed loops. To build an ample perspective of the applications' state-of-art and understand if they are compatible with polymers, the methodology chosen was bibliographic review of literature. Hence, it was possible to provide analogies and suggestions that may enable strategies that keep the value of plastics along their entire lifecycle and reduce the impacts related to their production.

Keywords: Blockchain, Plastics, Circular economy, Sustainability

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – MODELO LINEAR DE PRODUÇÃO	18
FIGURA 2 – EXEMPLOS DE CASCATA EM UM SISTEMA DE ECONOMIA CIRCULAR.....	19
FIGURA 3 – ESTRUTURA PRINCIPAL DE UM <i>BLOCKCHAIN</i>	25
FIGURA 4 – ETAPAS DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	28
FIGURA 5 – EXEMPLO DE CONTRATO INTELIGENTE	46

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 – ESTRUTURA <i>RESOLVE</i>	20
QUADRO 2 – TIPOS DE PLÁSTICOS E EXEMPLOS DE APLICAÇÃO.....	21
QUADRO 3 – USOS DE <i>BLOCKCHAIN</i> NA CATEGORIA TRANSPARÊNCIA E TRAÇABILIDADE.....	31
QUADRO 4 – USOS DE <i>BLOCKCHAIN</i> NA CATEGORIA TOKENIZAÇÃO E CRIPTOMOEDAS.....	36
QUADRO 5 – APLICAÇÕES DE <i>BLOCKCHAIN</i> NA CATEGORIA SEGURANÇA E CONFIABILIDADE	40
QUADRO 6 – APLICAÇÕES DE <i>BLOCKCHAIN</i> NA CATEGORIA CONTRATOS INTELIGENTES	44

LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS

BC - *Blockchain*

EC – Economia circular

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	16
1.1 CONTEXTO	16
1.2 OBJETIVOS.....	17
1.2.1 Objetivo geral	17
1.2.2 Objetivos específicos.....	17
1.3 JUSTIFICATIVA.....	17
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	18
2.2 ECONOMIA CIRCULAR	18
2.2 RESÍDUOS PLÁSTICOS – CENÁRIO ATUAL E PERSPECTIVAS	21
2.3 <i>BLOCKCHAIN</i> – PRINCIPAIS CONCEITOS E APLICAÇÕES POTENCIAIS.....	24
3. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	28
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	31
4.1 TRANSPARÊNCIA E TRAÇABILIDADE	31
4.2 TOKENIZAÇÃO E CRIPTOMOEDAS	35
4.3 SEGURANÇA E CONFIABILIDADE	40
4.4 CONTRATOS INTELIGENTES	44
5. CONCLUSÃO	48
6. REFERÊNCIAS.....	50

1. INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTO

A diversidade de plásticos existentes e características como resistência e maleabilidade os tornaram atraentes para uma série de aplicações, desde itens decorativos até peças para as indústrias aeroespacial e médica. Entretanto, existem também evidências abundantes de que a cadeia de produção apresenta impactos que, ao contrário de serem amortecidos, tem se tornado mais urgentes com o crescimento do setor nas últimas décadas.

Conforme citado pelo relatório “*The new plastics economy*” (2016), a produção dos plásticos consome 4-8% dos recursos fósseis extraídos, além de representar 80% de toda poluição marinha. As alternativas de descarte final existentes não foram capazes de absorver a quantidade de material gerado, fazendo com a maior parte do valor agregado ao objeto nas etapas de manufatura seja perdido.

A economia circular surge nesse âmbito como uma opção mais sustentável do que o modelo linear tradicionalmente adotado. O uso dos plásticos em ciclo fechado reduziria a necessidade de extrair mais recursos não-renováveis e diminuiria drasticamente a pressão nos ecossistemas marinhos, por exemplo. Além dos benefícios ambientais, ressalta-se o potencial econômico da mudança: possibilidade de redução de custos com processos mais eficientes, menores gastos com obtenção de matéria-prima, mitigação de riscos envolvidos com retirada de investimentos e não atendimento a regulamentações.

Apesar das vantagens, as organizações têm se deparado com diversos entraves durante desenvolvimento de iniciativas circulares, dentre os quais citam-se a falta de informação sobre o ciclo de vida de produtos e propriedades físicas dos resíduos. Acredita-se que tecnologias emergentes, como a de *blockchain*, poderiam ser aplicados pelas empresas na transição para modelos de produção mais circulares. Alguns exemplos de aplicação citados em literatura incluem a criação de históricos sobre o ciclo de vida do produto para implementação de estratégias de responsabilidade estendida dos fabricantes (SEKHRI, 2018; ESMAEILIAN, 2020) e incentivos monetários à coleta de resíduos (KATZ, 2019).

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

O presente trabalho realizou um levantamento na literatura sobre como as práticas de economia circular, em particular aquelas relacionadas a produtos plásticos, podem ser melhoradas com uso da tecnologia de *blockchain*.

1.2.2 Objetivos específicos

- Identificar que características de *blockchain* são de maior interesse para a inserção dos plásticos em outras cadeias produtivas;
- Elencar casos descritos em literatura sobre potenciais usos de *blockchain* como ferramenta para promoção de economia circular dos plásticos;
- Para exemplos de aplicações em outros segmentos que não o de polímeros, como o de resíduos sólidos em geral e eletroeletrônicos, avaliar a viabilidade de implementar estratégias semelhantes para o setor de plásticos.

1.3 JUSTIFICATIVA

Dado que o modelo circular pode ser uma alternativa viável para mitigar as externalidades relacionadas ao consumo de plásticos, convém averiguar quais recursos existentes podem ser empregados para auxiliar na transição, tornando-a mais atrativa. Dentre as opções, a tecnologia de *blockchain* se caracteriza como artifício emergente e ainda pouco explorado em interseção com o tema de economia circular. Dessa forma, nota-se a oportunidade de identificar de que maneiras os tópicos podem ser desenvolvidos em sinergia, auxiliando na construção de um sistema mais eficiente.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.2 ECONOMIA CIRCULAR

“Nós extraímos, produzimos e descartamos”. O atual modelo linear de produção no qual a economia se baseia é frequentemente descrito por esta frase, que resume três de suas etapas principais. No modelo, o fluxo de materiais tem início com a extração de matérias-primas, seguido de sua conversão em produtos, os quais são distribuídos, comprados e descartados pelos consumidores (FIGURA 1).

FIGURA 1 – MODELO LINEAR DE PRODUÇÃO.



FONTE: WAUTELET (2018), modificado pela Autora (2020).

Esta sequência de produção, somada ao foco em economias de escala e expansão por aumento na venda de produtos, tem sido a norma nos últimos 150 anos, durante os quais enorme crescimento econômico foi gerado – porém não sem consequências. Duas hipóteses associadas ao modelo linear são responsáveis por ocasionar grande pressão sobre os ecossistemas terrestres: a ideia de que os recursos extraídos e a capacidade de regeneração da Terra são infinitos (WAUTELET, 2018).

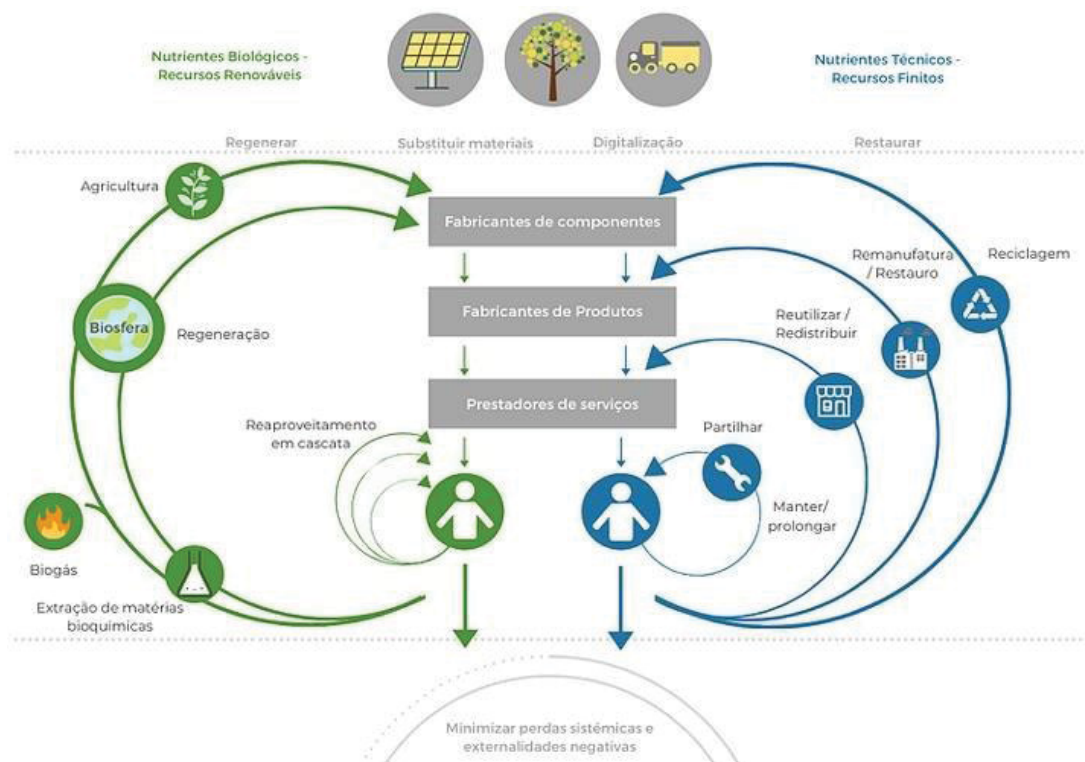
Hoje, têm-se evidências abundantes de que estas premissas conduzem a uma situação insustentável, que ameaça o planeta e os próprios sistemas produtivos. Os efeitos acumulados da exploração descuidada vêm se manifestando não somente na forma de eventos climáticos extremos, mas também na escassez de matérias-primas, volatilidade de preços e disrupção das cadeias de suprimentos. Para garantir o progresso da espécie humana, é urgente reconhecer as lacunas do modelo linear e seu relacionamento desbalanceado com o meio ambiente.

Foi neste contexto que surgiu o conceito de economia circular (EC). Uma síntese de diversas escolas de pensamento, o novo modelo de negócio é fundamentado nos princípios de regeneração dos ecossistemas naturais e eliminação

de lixo e poluição das cadeias. Os produtos pós-consumo passam a ser vistos como recursos a serem recuperados através de reciclagem e reuso e em seguida reinseridos em outros ciclos produtivos. Dessa forma, seu valor é mantido em circulação, reduzindo a necessidade de estratégias de descarte e extração de novas matérias-primas (ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2020).

O funcionamento da EC pode ser representado através da Figura 2. Os fluxos de materiais podem ser divididos em dois ciclos: um biológico (em verde) e outro “técnico” (em azul). O primeiro representa compostos biodegradáveis, que podem retornar aos sistemas naturais, enquanto o segundo abrange componentes sintéticos, como plásticos e químicos. As setas indicam algumas formas de como cada um pode ser inserido em outras partes da cadeia, incluindo meios como reaproveitamento de biomassa, compartilhamento de bens e reciclagem dos materiais. Quanto mais internas ao diagrama, mais as cascatas são capazes de preservar o valor agregado do produto.

FIGURA 2 – EXEMPLOS DE CASCATAS EM UM SISTEMA DE ECONOMIA CIRCULAR.



FONTE: BEECIRCULAR (2020).

A transição para uma economia circular envolve transformações profundas em diversos segmentos do meio industrial, desde o design de produtos até planejamento

da produção e cadeias de suprimento. Uma das ferramentas mais utilizadas por organizações para auxiliar no processo de mudança é a estrutura *ReSOLVE* (em inglês, *regenerate, share, optimize, loop, virtualize, exchange*), a qual fundamenta os princípios da EC em seis grupos de ações: regenerar, compartilhar, otimizar, circular, virtualizar e trocar. Uma breve descrição de cada item foi disposta no Quadro 1 a seguir:

QUADRO 1 – ESTRUTURA *RESOLVE*.

Ação	Descrição
Regenerar	Se refere à manutenção da bio-capacidade do planeta. Inclui troca de combustíveis fósseis por fontes de energia renovável e práticas de recuperação do solo.
Compartilhar	Máximo aproveitamento de bens para evitar aquisições duplicadas e desperdício. Um exemplo é o aluguel de carros e roupas.
Otimizar	Remoção de atividades sem valor agregado em processos produtivos e aumento de sua eficiência.
Circular	Manutenção de produtos dentro dos ciclos técnicos e biológicos através de biodegradação, remanufatura e reciclagem.
Virtualizar	É relativo à desmaterialização; tem objetivo de reduzir o transporte desnecessário de materiais. Inclui, por exemplo, a troca de informações via aplicativos como Skype e Zoom.
Trocar	Melhoria de processos através da adoção de novas tecnologias, tais quais o uso de matérias-primas renováveis e técnicas de manufatura aditiva.

.FONTE: JABBOUR et al (2018); KOUHIZADEH et al (2019).

Devido à novidade do conceito e do vasto conhecimento que precisa ser adquirido para apoiar o modelo proposto pela economia circular, sua adoção no meio corporativo ainda é modesta. Dentre os obstáculos identificados para implementação, citam-se incertezas a respeito do volume de investimentos requeridos, falta de informações sobre o ciclo de vida de produtos e acerca da qualidade dos materiais a serem recirculados e ausência de tecnologias para produção mais limpa (JABBOUR et al, 2018, JABBOUR et al, 2019).

Apesar da incerteza do momento inicial, pioneiros na adoção de elementos da EC podem exemplificar o seu potencial de ganhos. A francesa automotiva Renault

construiu uma planta de remanufatura para peças usadas em Choisy-le-Roi, França. No local, componentes mecânicos são redesenhados para facilitar o reuso e separação no pós-consumo. Outros itens, como motores e bombas de água, são reprocessados e vendidos a 50-70% do seu valor original. Em comparação com a produção de peças novas, as práticas adotadas atingiram reduções entre 70 e 80% no consumo de água e energia, e o site tem gerado ganhos superiores a U\$ 200 milhões por ano (WORLD ECONOMIC FORUM, 2020).

2.2 RESÍDUOS PLÁSTICOS – CENÁRIO ATUAL E PERSPECTIVAS

Plásticos podem ser definidos como materiais sintéticos ou semi-sintéticos produzidos a partir de polímeros orgânicos (PLASTICS EUROPE, 2020). O período entre 1850 e 1910 foi marcado pelas primeiras invenções do grupo, com os nomes parkesina, celulóide e baquelita aparecendo em objetos decorativos, rolos de filme e rádios. Desde então, as propriedades de resistência mecânica, durabilidade e baixo peso fizeram com que seu uso se expandisse para aplicações em setores como automobilístico, aeroespacial e médico.

Os atrativos desta família de produtos são vastos. Estima-se que a substituição de vidro ou metais por embalagens plásticas reduz as emissões de carbono durante o transporte e a contaminação de alimentos. Eles também podem ser encontrados em isolamentos térmicos que tornam o consumo de energia em prédios mais eficiente, equipamentos de segurança como capacetes e airbags, e nos equipamentos eletrônicos que trazem praticidade à vida moderna (RAYNAUD, 2014).

Tais fatores conferiram aos plásticos rápida popularidade, consolidando sua importância na indústria. Atualmente, os principais produtos são classificados em sete categorias, organizadas no Quadro 2, sendo PET o produzido em maior quantidade. Em 2019, o mercado total foi avaliado em U\$ 569 bilhões de dólares, com expectativa de crescimento superior a 3% ao ano (GRAND VIEW RESEARCH, 2020).

QUADRO 2 – TIPOS DE PLÁSTICO E EXEMPLOS DE APLICAÇÕES.

Categoria	Aplicações
PET ou PETE (polietileno tereftalato)	Garrafas de água, refrigerante e molhos, recipientes de geleias e doces, enchimento de roupas de inverno
HDPE (polietileno de alta densidade)	Sacolas de supermercado, frascos de shampoo, sabonete e detergente, brinquedos
LDPE (polietileno de baixa densidade)	Sacolas de supermercado e alimentos congelados, tampas flexíveis, frascos para condimentos
PP (polipropileno)	Utensílios de cozinha, fraldas, potes de iogurte, tampas de garrafa, containers para embalagem de alimentos
PS (poliestireno)	Copos para café, caixas para comida e talheres descartáveis, enchimento
PVC (polivinil cloreto)	Tubulações, calçados, painéis de janelas
Miscelâneos (policarbonato, acrílico, acrilonitrila, estireno, nylon, outros)	Óculos, mamadeiras, CDs, itens para iluminação

FONTE: QUALITY LOGO PRODUCTS (2020).

Entretanto, uma das externalidades associadas à produção dos plásticos vem ganhando destaque nas últimas décadas: inseridos no modelo linear, os agentes produtivos não foram capazes de gerenciar os resíduos pós-consumo em larga escala de maneira efetiva. Os volumes crescentes de material, sua resistência frente à degradação e a quantidade de produtos utilizados somente uma vez os colocaram no centro de uma grave crise ambiental.

Do total de plásticos manufaturados, apenas 21% são recuperados de alguma forma – 12% por incineração para geração de energia e 9% por reciclagem, enquanto os 79% restantes são descartados em aterros ou meios naturais (NATIONAL

GEOGRAPHIC, 2019). O problema tomou proporções tamanhas que plásticos correspondem a aproximadamente 80% da poluição marinha, e estima-se que até 2050 seu peso no oceano supere o de peixes. Adicionalmente, a cadeia consome de 4 a 8% de todos os recursos fósseis extraídos, sendo responsável por emissões associadas de poluentes atmosféricos, do solo e da água (RAYNAUD, 2014; MORLET et al, 2016).

Dentre os fatores que levaram ao desenvolvimento deste cenário estão incluídos o baixo custo dos produtos novos, que torna alternativas de recuperação pouco competitivas, e os diversos entraves que dificultam os processos de reciclagem. Primeiramente, nem todos os tipos de plástico podem ser reciclados por processos mecânicos, como é o caso de poliestireno e do grupo “Miscelâneos” indicado no Quadro 2.

Segundo, nem todos os tipos de material que podem ser reciclados o são de fato. Alguns não são coletados em quantidade suficiente para que os processos de recuperação sejam econômicos, enquanto outros estão presentes na forma de multicamadas ou blendas que não podem ser separadas. Os demais, quando agrupados, apresentam características heterogêneas de formato, pigmentos, contaminantes e aditivos, o que tornam a separação difícil e afeta a qualidade do produto resultante. Isso faz com que diversos plásticos sejam reciclados em aplicações diferentes das originais, de menor valor, como tubulações e sacos de lixo.

Por fim, a adoção de iniciativas de recuperação depende também da existência de políticas de incentivo. Na Europa Ocidental e Japão, é possível observar taxas de reciclagem de plástico de até 30% - três vezes a média global -, baseados em sólidas estruturas de coleta e impostos para incineração e aterros. Uma parte das externalidades do processo também é compensada por levantamento de fundos pelos fornecedores do material ou consumidores. (D'AMBRIÈRES, 2019)

Quando um objeto é descartado sem nenhuma forma de recuperação por reciclagem ou reuso, além dos danos mencionados ao meio ambiente, todo valor agregado criado nas etapas de manufatura se perde. Levando em consideração somente embalagens, as quais possuem taxa de coleta para reciclagem de 14% - superior à geral -, apenas 5% do valor original é retido, o que representa perdas de US 80-120 bilhões por ano para o setor (MORLET et al, 2016).

Caso houvesse uma transição da cadeia de plásticos para a economia circular, uma porcentagem significativamente maior do valor investido poderia ser mantida,

com benefícios de redução da poluição marinha e desacoplamento da produção da extração de recursos fósseis novos. Em paralelo, haveria crescimento da economia local – por exemplo, uma planta com capacidade de 50 mil toneladas de plástico reciclado empregaria em torno de 30 pessoas, mais do que em aterros ou incineração (D'AMBRIÈRES, 2019).

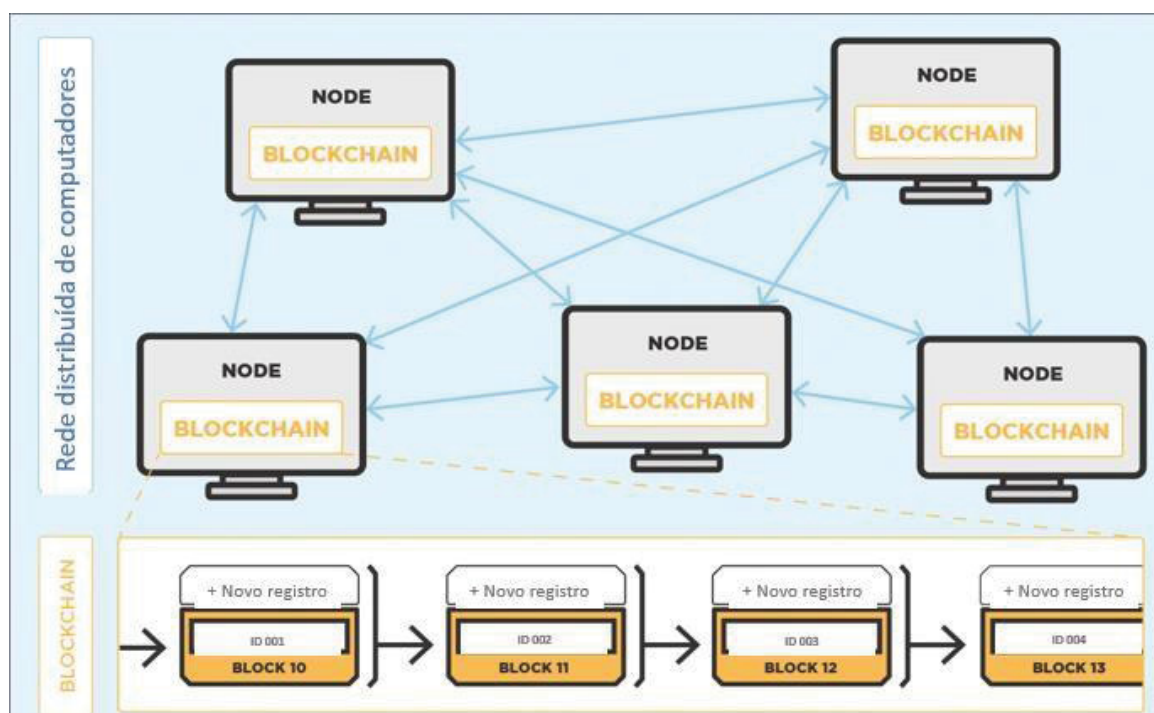
As adaptações da indústria de plásticos à EC passariam pelas alterações mencionadas anteriormente com a estrutura *ReSOLVE*, incluindo design de produtos de forma a facilitar reuso posterior e modificações nos processos atuais para receber os recicláveis como matéria-prima. Citam-se também a necessidade de sistemas de coleta e separação mais numerosos e eficientes e a maior disponibilidade de informações acerca da qualidade e quantidade de plástico disponível (WARREN, 2019; JABBOUR et al, 2018).

Ressalta-se que no Brasil o trabalho seria apoiado na rede já existente de cooperativas, catadores, empresas de reciclagem e produtoras de polímeros. As ações de reinserção dos plásticos nos ciclos produtivos também encontram respaldo no aparato legislativo: a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS). Aprovada em 2010, esta prevê a participação dos setores público e privado no gerenciamento de produtos pós-consumo.

A normativa divide a responsabilidade pelo descartado entre todos os participantes da cadeia, e exige que empresas e o governo atuem na implementação de estruturas de logística reversa para reintrodução dos itens nos processos produtivos. Apesar de a lei não citar o termo “economia circular”, os elementos do texto podem facilmente ser reconhecidos como tal.

2.3 *BLOCKCHAIN* – PRINCIPAIS CONCEITOS E APLICAÇÕES POTENCIAIS

Blockchain se caracteriza como uma base de dados distribuída entre participantes independentes, cujos registros são protegidos por recursos criptográficos e se tornam praticamente imutáveis após escritos. Quando a tecnologia foi descrita pela primeira vez em 2008, sua aplicação principal eram as criptomoedas, dentre as quais *Bitcoin* segue como a maior representante (NAKAMOTO, 2009).

FIGURA 3 – ESTRUTURA PRINCIPAL DE UM *BLOCKCHAIN*.

FONTE: JUNESTRAND (2019), modificado pela Autora (2020).

Sua estrutura é constituída de três partes principais: blocos, corrente e rede (FIGURA 3). Nos primeiros encontram-se uma lista de transações realizadas, semelhante ao que se encontraria em um extrato bancário, e alguns itens que identificam o bloco. Esses são unidos matematicamente pela corrente de tal forma que, para adicionar um novo bloco ao grupo, é necessário ter a identidade do anterior. A rede, por sua vez, é composta pelos computadores – ou nós - que executam os algoritmos do *blockchain* e o mantém funcionando. Cada nó possui uma cópia completa de toda cadeia (LAURENCE, 2017).

Como a estrutura é distribuída entre vários participantes, sem uma figura central que possa avaliar se um novo bloco deve de fato ser adicionado, o consenso é dado através de concordância, seguindo os passos abaixo (NAKAMOTO, 2009):

- 1) Novas transações são transmitidas a todos os nós, que as coletam em um bloco;
- 2) Os nós trabalham para encontrar um *proof-of-work* para o seu bloco e, quando o encontram, o divulgam para toda a rede;
- 3) Os demais nós validam o *proof-of-work* e expressam aceite pelo novo bloco utilizando sua identificação para criar outros.

Proof-of-work refere-se a um problema matemático que o nóculo precisa resolver para validar o novo bloco. A resolução exige grande esforço computacional e eletricidade – no caso do *Bitcoin*, alguns equipamentos requerem inclusive sistemas de refrigeração especiais. Na maioria das plataformas de criptomoedas, a dificuldade em produzir um bloco válido é recompensada por uma certa quantidade de dinheiro. Em 2020, um bloco novo gerava 12,5 bitcoins, sendo que uma unidade da moeda estava avaliada em aproximadamente U\$ 23 mil (COINBASE, 2020).

Como um bloco novo precisa da identidade do anterior, uma pequena alteração na cadeia seria observada em todos os itens subsequentes, e todos os *proof-of-work* precisariam ser recalculados. Esse é o mecanismo por trás da imutabilidade do *blockchain* – uma alteração em transações passadas exigiria que a cadeia inteira fosse validada novamente. Além disso, as transações utilizam um sistema de chaves criptografadas para impedir ações fraudulentas entre partes, o que confere confiança ao sistema.

Ausência de controle centralizado, transparência, e a possibilidade de manter um registro único contendo todas as trocas realizadas entre participantes fizeram com o interesse pela tecnologia se estendesse além do setor financeiro. Acredita-se que *blockchain* pode ser particularmente útil em situações nas quais um vasto número de indivíduos precisa manter um repositório conjunto de dados, com mínima confiança instituída entre as partes. Citam-se também casos de cadeias com muitos intermediários, nas quais é necessário traçar a trajetória de determinado produto ou informação (WARREN, 2018).

Assim como para outras tecnologias emergentes, a implementação de projetos envolvendo *blockchain* é em sua maioria de pequena escala. Muitas organizações enfrentam obstáculos como falta de profissionais especializados e de uma metodologia consolidada que possam utilizar como guia. Apesar disso, alguns exemplos já ilustram o potencial do *blockchain*, em particular com relação ao desenvolvimento da economia circular.

O sistema foi empregado pela Toyota em um sistema de compartilhamento de veículos e pela BASF, empresa do setor químico, no acompanhamento do ciclo de vida de produtos para a indústria automotiva (KOUHIZADEH et al, 2019). Kouhizadeh et al (2018) também sugerem que o recurso pode auxiliar para garantir que a origem de produtos seja sustentável e o trabalho empregado em sua confecção tenha sido em condições dignas. Outros usos incluem a contabilização de emissões de carbono

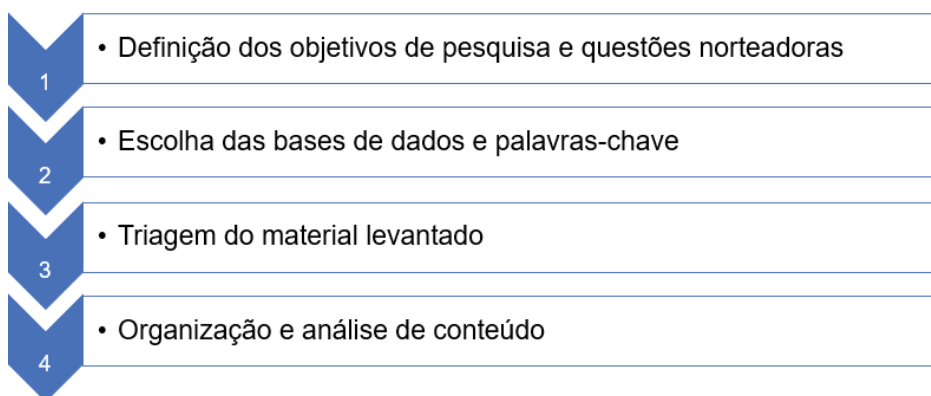
e poluentes ao longo da manufatura, simplificação do processo de certificação e incentivo a práticas de reciclagem.

3. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Conforme mencionado por Jabbour et al (2018) e Tseng et al (2018), a interseção entre os temas relacionados a tecnologias emergentes como *blockchain* e economia circular ainda não foi largamente discutida, uma vez que os dois assuntos são normalmente tratados de forma individual. A existência dessa lacuna, também observada durante elaboração da revisão bibliográfica, se torna ainda mais evidente considerando aplicações específicas ao grupo dos materiais poliméricos.

Tendo isso em vista, o presente trabalho se propõe a investigar com maior profundidade o potencial do *blockchain* no fomento de iniciativas circulares no setor de plásticos, utilizando como ferramenta a revisão sistemática da literatura. Este método permite construir um panorama amplo de um tópico particular tendo como base as melhores evidências disponíveis, possibilitando sintetizar o conhecimento produzido até então (SNYDER, 2019). Um fluxograma simplificado das etapas adotadas, baseadas na metodologia de Tranfield et al (2003), foi representado na Figura 4.

FIGURA 4 – ETAPAS DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.



FONTE: TRANFIELD ET AL (2003), modificado pela Autora (2021).

Conforme ilustrado, na primeira etapa definiu-se o objetivo da pesquisa. Este propósito foi tido como identificar e caracterizar aplicações de *blockchain* nos diversos pontos da estrutura *ReSOLVE* – regenerar, compartilhar, otimizar, circular, virtualizar, trocar. Dentre as questões que nortearam o estudo, destacam-se entender quais os benefícios e barreiras para implementação da tecnologia no contexto da EC, em que estágio de maturidade se encontram os projetos e quais pontos precisam ainda ser melhor estudados para contribuir com o seu aperfeiçoamento.

Em um segundo momento, prosseguiu-se com a escolha das bases de dados para levantamento dos artigos. Estas consistiram em artigos publicados em periódicos científicos entre 2008 e fevereiro de 2021, acessíveis em plataformas de busca renomadas, tais quais *Science Direct*, *Engineering Village* e *Scopus*. O período escolhido permite acompanhar a evolução do *blockchain* desde seu surgimento, e uma vez aliado à abrangência e à qualidade das bases, foi considerado adequado para produção de uma avaliação robusta.

Dando continuidade ao método, a terceira etapa teve como escopo a construção inicial de conteúdo, bem como sua filtragem. Para tanto, pesquisou-se por títulos, resumos e palavras-chave de artigos utilizando os termos: “*blockchain*” e “*circular economy*”, preferencialmente de estudos que tratassem do segmento de plásticos, estratégias de reciclagem, reuso e remanufatura e gerenciamento de resíduos.

Tendo em vista a configuração das plataformas, todas as buscas foram realizadas em inglês. Dado o pequeno número de artigos associados especificamente ao contexto dos plásticos, a busca foi ampliada para conter também exemplos de uso da tecnologia para itens semelhantes, cuja ideia da aplicação pudesse ser desdobrada para outros materiais.

A relevância dos arquivos resultantes da busca foi então avaliada mediante leitura do resumo e conclusão dos textos. Foram excluídos artigos que tratassem de aplicações de *blockchain* em sistemas sem a presença de um dos elementos da estrutura *ReSOLVE*, como no rastreamento de itens em cadeias de suprimento tradicionais e na elaboração de contratos inteligentes fora do contexto da economia circular.

Ao final da triagem, havia 35 artigos disponíveis para estudo, dos quais apenas sete eram particulares aos plásticos. Os demais correspondiam a exemplos de itens diversos, porém com potencial de aplicação no setor de polímeros. Os países onde estão localizadas as instituições de pesquisa são bastante diversos, com destaque para regiões europeia e asiática, que juntas representam aproximadamente 75% das contribuições.

Cerca de um terço dos trabalhos se referiam a revisões de literatura, enquanto outros apresentavam estudos de caso e propostas de sistemas envolvendo *blockchain* – alguns incluíam até mesmo protótipos em fase em teste. Outra característica relevante sobre os artigos se refere ao ano das publicações: apesar de o período

considerado na busca ter sido superior a dez anos, os artigos que atenderam aos critérios de estudo se concentraram entre 2018 e 2021. Nesse intervalo, houve uma crescente no número de artigos, saltando de 4 em 2018 para 18 em 2020. Isso evidencia o caráter emergente das aplicações de *blockchain* em economia circular e seu potencial, que vem despertando bastante interesse nos mundos corporativo e acadêmico.

Por fim, na quarta etapa da elaboração do estudo, com objetivo de proporcionar maior clareza na discussão de resultados, os achados principais foram organizados em categorias, de acordo com a característica de *blockchain* mais relevante para o artigo apresentado. Conforme elencado por Kouhizadeh et al (2019), as categorias são:

- 1) Transparência e rastreabilidade;
- 2) Tokenização e criptomoedas;
- 3) Segurança e confiabilidade;
- 4) Execução/contratos inteligente.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após execução do procedimento descrito anteriormente, foi possível construir um panorama das aplicações de *blockchain* em economia circular e identificar os casos mais promissores para o setor de plásticos. Um compilado sobre os principais aspectos dos exemplos apresentados nos artigos foi organizado no texto subsequente, juntamente com avaliação crítica das ideias propostas.

4.1 TRANSPARÊNCIA E TRAÇABILIDADE

Traçabilidade refere-se à capacidade de acompanhar o percurso de um produto ou conhecer seus processos de manufatura, desde fabricação até expedição. O emprego de *blockchain* traz consigo o potencial de monitorar essas etapas de transformação, as quais são normalmente desconhecidas para o público que não está diretamente envolvido no processo, proporcionando desta forma maior transparência às cadeias produtivas.

Na categoria encontram-se 19 estudos (Quadro 3), os quais citam *blockchain* e traçabilidade principalmente como forma de melhorar fluxos de informações e materiais. Estes dados podem então ser utilizados em diversas aplicações, como precificação de recursos e estratégias de *cap-and-trade*. Nota-se que este tópico foi o mais citado em artigos relacionando economia circular à tecnologia, o que confirma a importância do tema e o interesse do meio acadêmico em seu avanço.

QUADRO 3 – USOS DE *BLOCKCHAIN* NA CATEGORIA TRANSPARÊNCIA E TRAÇABILIDADE.

Autores	Proposta ou caso relatado	Item relacionado à estrutura <i>ReSOLVE</i>	País de afiliação dos autores
Esmailian et al (2020)	<i>Blockchain</i> para otimizar estratégias de responsabilidade estendida dos fabricantes	Otimizar, circular	Estados Unidos
Sankaran (2019)	Carta do setor industrial sobre o uso de <i>blockchain</i> como solução para desafios do gerenciamento de resíduos plásticos	Otimizar, circular	Finlândia
Chidepatil et al (2020)	Uso de BC e sensores inteligentes para melhor disposição de resíduos plásticos	Otimizar, circular	Finlândia

Autores	Proposta ou caso relatado	Item relacionado à estrutura <i>ReSOLVE</i>	País de afiliação dos autores
Bellini et al (2019)	O papel de BC nos novos modelos de negócio da economia circular dos plásticos	Circular	Itália
Farooque et al (2020)	Barreiras à implementação de Análise de Ciclo de Vida com <i>blockchain</i>	Otimizar, circular	Nova Zelândia, Reino Unido, China, Paquistão
Zhang et al (2020)	Proposta para uso de <i>blockchain</i> em Avaliações de Ciclo de Vida	Otimizar, circular	Nova Zelândia, Austrália, China, França, Reino Unido
Shakhbulatov et al (2019)	Uso da tecnologia de BC na contabilização de emissões de carbono em transporte de alimentos	Otimizar, circular	Estados Unidos
Saberi, Kouzihadeh e Sarkis (2018)	Ressalvas e barreiras relativas a aplicações de <i>blockchain</i>	Otimizar, circular	Estados Unidos
Issaoui et al (2019)	<i>Blockchain</i> como ferramenta para logística inteligente e <i>supply chain</i>	Otimizar, circular	Marrocos
Sekhri (2018)	Gerenciamento de resíduos plásticos e formalização do setor informal com <i>blockchain</i>	Otimizar, circular	Estados Unidos
Tozanli, Kongar e Gupta (2020)	Uso de BC em estratégias de remanufatura de eletroeletrônicos	Otimizar, circular	Estados Unidos
Wang et al (2020)	Revisão bibliográfica sobre usos de BC na construção da economia circular	Otimizar, circular	Alemanha
Upadhyay (2021)	Traçabilidade como forma de garantir a qualidade de produtos transferidos em cadeias de suprimento complexas	Otimizar, circular	Inglaterra, Turquia
Ajwani-Ramchandani et al (2021)	<i>Blockchain</i> para disposição segura de resíduos sanitários na Índia	Otimizar, circular	Índia, Austrália
Wang et al (2019)	Implementação de logística reversa para baterias de carro usadas	Otimizar, circular	China
Leng et al (2020)	Tecnologias da Indústria 4.0 em manufatura sustentável	Otimizar, circular	China
Dutta et al (2020)	Uso de <i>blockchain</i> em cadeias de suprimento sustentáveis	Otimizar, circular	Índia, China

FONTE: a Autora (2021).

Observa-se ainda que, apesar de as menções corresponderem a quase metade de todo conjunto de artigos levantados, nem todos apresentavam análises aprofundadas sobre o tema. Alguns autores trazem em seus textos o argumento de que a traçabilidade promovida por *blockchain* pode ser definitiva para a economia

circular, mas acabam por não trazer propostas detalhadas de aplicações. Assim, nesta seção, procurou-se enfatizar os exemplos mais inovadores encontrados nos artigos.

Nos trabalhos de Sekhri (2018) e Esmaeilian et al (2020), traz-se a possibilidade de utilizar *blockchain* aliada à sensores na implementação de projetos de responsabilidade estendida do fabricante. Esmaeilian et al (2020) mencionam que uma série de insucessos destes programas foi atribuída à dificuldade em rastrear e monitorar os produtos descartados de acordo com suas marcas.

Por conta disso, a alternativa encontrada por algumas empresas foi pagar taxas ao governo proporcionais à sua participação no mercado. Um programa baseado em *blockchain* permitiria a melhor quantificação do material produzido e descartado por cada produtor, minimizando discrepâncias de volumes e viabilizando a correta responsabilização de cada agente.

Uma estratégia semelhante poderia auxiliar na execução da PNRS no Brasil. O acordo setorial de embalagens - incluindo aquelas de material plástico – foi firmado em 2015, com primeira fase do plano finalizada dois anos depois. Dentre as ações planejadas, destaca-se a redução em 21,3% no volume de embalagens descartadas em aterros e a criação de um sistema de monitoramento da quantidade de embalagens introduzidas no mercado interno, bem como as recuperadas após acordo (COALIZÃO EMBALAGENS, 2017).

Uma plataforma de BC poderia ser se enquadrar nos requisitos de sistema de monitoramento, com maior controle sobre volumes de plástico produzidos por cada empresa e permitindo sua devida responsabilização. Além disso, poderia viabilizar avaliação mais eficiente das ações propostas - dado o grande número de agentes dispersos pelo país, a quantificação foi mencionada no relatório da fase 1 como um dos desafios operacionais, o que se refletiu no prazo de 36 meses para que as cooperativas de reciclagem contabilizassem cerca de metade do volume de embalagens recolhido (COALIZÃO EMBALAGENS, 2017).

Um segundo benefício associado à traçabilidade é a criação de um histórico sobre o produto, desde sua criação até a disposição. Segundo Sankaran (2019) e Chidepatil et al (2020), um dos fatores que influencia a demanda por plástico reciclado é a falta de informações sobre qualidade, quantidade disponível e viabilidade para determinadas aplicações. Sem essas informações, os produtores não são encorajados a buscar material reciclável para seus produtos em vez de matéria-prima nova.

A evolução de *blockchain* e sensores inteligentes pode suprir essa lacuna e melhorar tanto os processos de segregação quanto os de reciclagem. Dados como cor, tamanho, forma, composição, densidade e outras propriedades físico-químicas podem ser coletadas ao longo das transformações do polímero. Em seguida, seriam distribuídas e validadas na plataforma de BC, se tornando base para transações entre segregadores, recicladores e fabricantes de produto acabado.

A manutenção desses dados ao longo das transformações do item pode facilitar a escolha das estratégias de reciclagem mais adequadas, bem como sua introdução em outros ciclos produtivos – a correta identificação de que um produto é feito de PET, por exemplo, pode destiná-lo à reciclagem mecânica e fabricação de novas embalagens adequadas para contato com alimentos. Poliestirenos, por outro lado, poderiam ser enviados preferencialmente para aterros.

Ademais, conforme mencionado por Bellini et al (2019), a transparência sobre histórico do produto pode suportar esquemas de precificação de recursos por taxas *cap-and-trade*. Isso se traduziria como instrumento regulatório que oferece quantidade limitada de créditos para utilizar denominado recurso – polímero proveniente de matéria-prima nova, por exemplo. A partir do momento em que uma empresa ultrapassar seu consumo máximo, ela seria obrigada a comprar créditos de outras organizações que utilizassem plástico reciclado ou biodegradável em seus processos.

Uma variação dessa estratégia seria uma espécie de “taxa de carbono” para os plásticos. As entidades governamentais poderiam exigir como parte da licença de operação que as empresas detivessem tais históricos de ciclo de vida, demonstrando a origem dos recursos utilizados e tipo de processo químico empregado. Aqueles que tivessem características mais poluidoras, ou que não destinassem corretamente seus resíduos, pagariam uma taxa, tornando produtos recicláveis mais competitivos frente aos tradicionais.

Por fim, uma aplicação ainda mais sofisticada de rastreabilidade seria no emprego de *blockchain* como ferramenta auxiliar para Análises de Ciclo de Vida, conforme proposto por Zhang et al (2020) e Farooque et al (2020). A análise vem ganhando visibilidade nos últimos anos como uma importante forma de quantificar impactos ambientais de produtos ou serviços, e seus resultados têm sido utilizados como base para tomada de decisões em marketing, design, seleção de produtos e planejamento estratégico.

Devido à complexidade envolvida em quantificar entradas e saídas de material nos diversos estágios da cadeia de suprimentos, em especial quando estas são geograficamente dispersas, um dos grandes desafios à sua realização é justamente a obtenção de dados representativos sobre transformações do produto. Quando aliada à Internet das Coisas, *blockchain* pode ser uma solução para o problema. Juntas, as tecnologias podem criar um registro imutável de cada momento do ciclo de vida de um item, gerando legitimidade, autenticidade e rastreabilidade.

A importância de se ter um banco de dados mais robusto se torna ainda mais crítica quando se trata de economia circular, pois a análise adquire um caráter berço-a-berço, em vez do tradicional berço-a-túmulo. Com as informações disponíveis, seria possível elaborar melhores estratégias de gerenciamento de resíduos e determinar o benefício de se utilizar materiais recicláveis no processo de fabricação.

Entretanto, diversos autores ressaltam que a tecnologia ainda se encontra em estágio inicial de desenvolvimento e existem diversos entraves a aplicações como as mencionadas anteriormente. Em especial, ressalta-se a possibilidade de que as empresas não queiram tornar mais transparentes seus processos e cadeia produtivas, justamente pelo fato de se tornarem vulneráveis a taxas, penalidades ou outras desvantagens competitivas.

4.2 TOKENIZAÇÃO E CRIPTOMOEDAS

Tokenização se refere ao processo de transformar ativos em *tokens*, unidades que refletem o valor monetário associado ao item. Uma quantia de R\$100 poderia, por exemplo, ser convertida em 50 *tokens* de R\$2 e negociada sem que o ativo real seja modificado. Além de facilitar transações, outras funções incluem o uso como unidade própria de contabilização e como forma de garantir direitos exclusivos de uso a determinado serviço ou produto ao detentor dos *tokens*.

A princípio, não existem limites para a natureza dos ativos que podem ser tokenizados. Em aplicações de *blockchain*, os *tokens* podem ser tanto as criptomoedas nativas – como Bitcoin –, quanto outros itens cuja troca é apenas mediada pela tecnologia. A plataforma Ethereum é um caso em que ambos os tipos coexistem: um ativo pode ser tokenizado e transferido entre usuários, e a cada troca uma certa quantidade de Ether, a moeda nativa, é necessária para efetivar a transação.

A possibilidade de viabilizar a criação de moedas alternativas e a troca de *tokens* pode ser empregada de múltiplas formas em economia circular, conforme ilustrado pelos sete trabalhos enquadrados nessa categoria (Quadro 4). Dentre as aplicações principais, destacam-se o incentivo a ações consideradas sustentáveis e angariação de fundos em eventos de *crowdfunding*.

QUADRO 4 – USOS DE *BLOCKCHAIN* NA CATEGORIA TOKENIZAÇÃO E CRIPTOMOEDAS.

Autor	Proposta ou caso relatado	Item relativo à estrutura <i>ReSOLVE</i>	País de afiliação dos autores
Esmailian et al (2020)	Incentivo ao consumo de produtos verdes e ações sustentáveis	Circular	França
Gopalakrishna e Ramaguru (2019)	Incentivo à coleta e reciclagem de resíduos sólidos	Circular	França, Suíça
Faixó e Cañada (2020)	Uso de incentivos para aumentar a taxa de reciclagem municipal	Circular	Brasil
França et al (2020)	Transferência de moeda local para uma plataforma de <i>blockchain</i> ; incentivo à coleta e reciclagem de resíduos sólidos	Circular, virtualizar e trocar	Índia
Cluchet, Koscina e Lombard-Platet (2019)	Incentivo à conscientização e reciclagem de resíduos sólidos; <i>crowdfunding</i>	Circular	Estados Unidos
Katz (2019)	Incentivo à remoção de plástico dos oceanos e redução da pobreza	Circular	Espanha
Narayan e Tidström (2020)	Uso de tokens como forma de gerenciar a coopetição	Otimizar	Finlândia

FONTE: a Autora (2021).

Nota-se que o incentivo a determinados comportamentos corresponde à maior parte dos exemplos relatados em literatura. Esmailian et al (2020) argumentam que os hábitos dos consumidores têm papel fundamental na promoção da sustentabilidade, de forma que é importante envolvê-los no desenvolvimento da economia circular.

Nesse âmbito, as criptomoedas podem ser utilizadas como recompensa pela compra de produtos com pegada neutra de carbono (projeto da *start-up* CarbonX), por retornar materiais recicláveis a pontos de coleta (plataforma RecycleToCoin) ou por ter atitudes benéficas para o meio ambiente, como ir de bicicleta para o trabalho (EcoCoin). Vendedores certificados, inspeções e sensores IoT (*Internet of Things*) são utilizados como mecanismos para comprovar se as ações ocorreram de fato.

Gopalakrishna e Ramaguru (2019) defendem que o papel da tecnologia não deve se limitar à automatização de atividades nas etapas de coleta e transporte, e sim evoluir como instrumento para monitorar todo gerenciamento de resíduos sólidos. Ainda, apontam que as pessoas continuam sendo parte integral do processo, o que acarreta desafios como falta de conhecimento na separação de resíduos na fonte geradora e a construção de aterros impróprios. Os autores mencionam projetos que utilizam criptomoedas como formas de incentivo à separação e coleta de materiais recicláveis, tais quais Plastic Bank, Swachhcoin e Recereum.

No trabalho de Faixó e Cañada (2020), reforça-se a posição de que sustentabilidade precisa ser promovida tanto por políticas públicas quanto por ações de consumidores e corporações. A ideia proposta pelos autores é de que as empresas absorvam maior responsabilidade pelos resíduos gerados por suas embalagens e produtos em fim de útil, patrocinando recompensas aos cidadãos que fizessem sua correta segregação e descarte. Uma vez que os materiais fossem entregues e contabilizados em pontos de coleta adequados, uma parte dos *tokens* seria transferida para a carteira digital do consumidor, e outra seria creditada à prefeitura por ceder a infraestrutura necessária à gestão de resíduos. Os *tokens* poderiam então ser trocados por desconto em transporte público, abatimento de impostos ou cupons para produtos sustentáveis.

França et al (2018) trazem em seu artigo um exemplo de como *blockchain* foi escolhido para substituir um sistema de incentivos já existente na cidade de Santa Cruz, em São Paulo. O esquema anterior incentivava pessoas de baixa renda a separar resíduos sólidos gerados em suas residências e entregá-los em pontos de coleta. Na entrega, os resíduos eram trocados por Moedas Verdes, cartões de plástico que funcionavam como *tokens* para troca por produtos em padarias, farmácias e supermercados locais. Os estabelecimentos declaravam quantos cartões haviam recebido por mês e eram ressarcidos pela prefeitura, que por sua vez vendia os resíduos a empresas de reciclagem.

Os cartões de plástico tinham a limitação de ser impressos em xerox, sem prevenção contra fraudes. Na plataforma nova, todas as transações são virtuais, e as carteiras digitais contendo as Moedas Verdes são gerenciadas via aplicativo. Cidadãos que não possuem celular ou computador recebem códigos QR impressos para viabilizar a troca.

Além da garantia de integridade das informações e autenticidade das moedas em uso, os autores mencionam como benefícios o desenvolvimento de cidades sustentáveis e a maior percepção de jovens sobre descarte correto de resíduos. A mudança também facilita a expansão do projeto – a meta era envolver 90% da população até 2020.

Além do incentivo a determinados comportamentos, o projeto PlasticTwist descrito por Cluchet, Koscina e Lombard-Platet (2019) traz ainda outras funcionalidades com objetivo de reduzir a quantidade de plástico gerado e mudar a percepção do público sobre produtos feitos de material reciclado. As criptomoedas foram escolhidas como instrumento seguro, prático e transparente de fidelização e fomento da economia local.

Através da plataforma, usuários podem ser recompensados pelo reuso e coleta de itens plásticos, participação em palestras de conscientização, tempo dedicado a jogos e *quizzes* educativos, dentre outros. Uma segunda aplicação é a ferramenta de *crowdfunding*, na qual a oferta inicial de criptomoedas é utilizada como forma de angariar fundos para financiamento de projetos sustentáveis. Em troca do investimento realizado, as moedas podem ser posteriormente vendidas ou utilizadas em troca de produtos ou serviços desenvolvidos. À época da publicação do artigo, o PlasticTwist contava com pilotos na Suíça, Grécia e Holanda.

Outra aplicação em estágio maduro de desenvolvimento é o Plastic Bank, descrito por Katz (2019). O projeto surgiu em 2014 com a proposta de reduzir a quantidade de plástico nos oceanos e aliviar a pobreza em regiões de vulnerabilidade, e atualmente encontra-se em países como Haiti, Indonésia e Filipinas. Os resíduos coletados por catadores são trocados por *tokens* que dão acesso à água, internet, eletricidade e até mesmo mensalidade escolar.

O plástico, por sua vez, é reciclado e vendido para empresas como o nome de Social Plastic. Como a tecnologia de *blockchain* permeia toda a cadeia, desde a coleta até a venda, o caminho do resíduo pode ser facilmente auditado pelas organizações que desejem confirmar se ele de fato foi recolhido do oceano por um colaborador cadastrado. Isso garante transparência e segurança à aplicação.

Finalmente, Narayan e Tidström (2020) citam a tokenização como forma de facilitar o gerenciamento da coopetição entre empresas. Esta é caracterizada como um relacionamento paradoxal entre atores, que simultaneamente competem e cooperam entre si. Nesse âmbito, o papel da *blockchain* seria primeiramente conter

informações sobre todo ciclo de vida de determinado produto, incluindo recursos utilizados e transações às quais ele foi submetido.

O acesso a itens dessa documentação seria o ativo negociado através dos *tokens* – entende-se que o conhecimento sobre as etapas de produção de um item é valioso para inovações relacionadas ao design, estratégias de remanufatura, reuso e reciclagem. Portanto, quem detém os dados encontra-se em vantagem e pode monetizá-los para competidores ou cedê-los quando houver possibilidade de projetos conjuntos.

A partir do apanhado de artigos levantados, cabe também apontar algumas ressalvas referentes à implementação de *blockchains* envolvendo moedas nativas para recompensar consumidores. Os autores consideram a economia de *tokens* um assunto complexo, que deve ser bem estudado antes do teste. O projeto precisa ter escopo bem delimitado, tendo definido quais tipos de comportamento premiar, quanto devem receber, e qual formato de gratificação escolher. Ao premiar o consumo de um produto com crédito na loja, por exemplo, as pessoas podem se sentir compelidas a realizar uma nova compra sem necessidade para receber o bônus novamente. Ainda, se o prêmio puder ser trocado diretamente por dinheiro, ele pode ser gasto em produtos não sustentáveis.

Adicionalmente, nota-se que o caminho para implementação dos projetos pode variar bastante a depender da infraestrutura já existente e o público-alvo escolhido. Faixó e Cañada (2020) consideram *blockchain* uma iniciativa avançada, que teria mais sucesso em cidades que já possuísem políticas maduras para reciclagem – na América do Sul, os autores estimam que o ganho seria um salto de 10 para 30% na taxa de reciclagem municipal, enquanto na Europa seria possível levar este número de 40 para 70%.

Também como ponto de comparação, enquanto Cluchet, Koscina e Lombard-Platet (2019) citam o amplo acesso à internet como vantagem para adesão ao PlasticTwist, esta questão foi considerada uma vulnerabilidade por França et al (2020) e Katz (2019). Ao contrário dos pilotos em cidades europeias, a falta de celulares e internet foi outro desafio encontrado nos projetos que foram concebidos em países em desenvolvimento, com grupos de baixa renda.

Por fim, ainda que nem todos os trabalhos estudados tratassem especificamente de aplicações a resíduos plásticos, nota-se que a estratégia de incentivar a coleta e descarte correto destes itens é interessante, de aparente

viabilidade técnica e boa aceitação por parte do público. Ao associar esses comportamentos a prêmios, a tokenização evidencia o valor dos itens como potenciais matéria-prima em outros ciclos produtivos, torna menos atrativa a opção dos aterros e lixões, e aumenta a vida útil dos recursos que foram extraídos.

Além disso, as moedas alternativas podem incentivar a economia local e a inclusão de grupos de baixa renda, dois fatores que são bastante significativos para a realidade brasileira. Seguindo as propostas apresentadas por Faixó e Cañada (2020) e França et al (2020), em particular, nota-se que a tokenização poderia ser aplicada com apoio de prefeituras e entidades municipais como forma de facilitar a implementação da PNRS para o setor, enforcing a responsabilidade estendida dos fabricantes de embalagens ou produtos plásticos.

4.3 SEGURANÇA E CONFIABILIDADE

Uma terceira característica amplamente associada a *blockchain* refere-se à segurança e confiabilidade que a tecnologia proporciona. Isso advém da maneira como as informações são registradas na base de dados - codificadas por meio de criptografia e verificadas por meio de protocolos de consenso distribuídos. Além disso, uma vez que a identificação de um bloco de informações depende do seu anterior, seu histórico é praticamente imutável, pois isso também mudaria todos os demais blocos na cadeia.

Nessa categoria encontram-se três artigos, cujas propostas foram resumidas no Quadro 5. Dentre os eles, destacam-se o uso de blockchain como potencial para viabilizar negociações seguras em plataformas de compartilhamento e no combate à venda de produtos falsificados.

QUADRO 5 – APLICAÇÕES DE *BLOCKCHAIN* NA CATEGORIA SEGURANÇA E CONFIABILIDADE.

Autores	Proposta ou caso relatado	Item relacionado à estrutura <i>ReSOLVE</i>	País de afiliação dos autores
Kostyuk et al (2020)	Uso de <i>blockchain</i> para redução de fraudes na fabricação de tubulações de polietileno	Otimizar	Inglaterra

Autores	Proposta ou caso relatado	Item relacionado à estrutura <i>ReSOLVE</i>	País de afiliação dos autores
Li et al (2020)	<i>Blockchain</i> como plataforma para gerenciamento e troca de informações sobre remanufatura	Otimizar, compartilhar, circular	China
Liu, Zhang e Medda (2021)	Desenvolvimento de uma base de dados confiável sobre qualidade e potencial de reciclagem de itens plásticos	Otimizar, circular	Rússia

FONTE: a Autora (2021).

Kostyuk et al (2020) discutem em seu artigo uma discrepância entre a quantidade reportada de polietileno que seria destinada à produção de tubulações e o número de itens de fato produzido. A diferença foi atribuída à falsificação de produtos com material de qualidade inferior, um problema que incomoda bastante o grupo de empresas que necessita desses tubos.

A solução encontrada para proteger as empresas da venda de produtos falsificados foi um sistema de verificação baseado em *blockchain*. A cadeia seria de acesso restrito, com cadastro de participação mediado por entidades como o Ministério do Comércio. Uma vez cadastrada, a própria organização teria autonomia para dar acesso à base aos seus funcionários.

Na cadeia, as empresas produtoras de tubulações os identificariam com códigos QR contendo informações sobre sua fabricação, as quais seriam armazenadas na cadeia ao longo de todos os estágios de transformação. Assim, os compradores poderiam consultar essa base de dados e se assegurar da autenticidade do material adquirido. Em teste piloto realizado com algumas empresas do segmento, verificou-se que a tecnologia aumentou a confiança nos fornecedores e na qualidade do material, além de facilitar a contabilização dos estoques. Acredita-se que um sistema análogo poderia ser empregado também para garantir que determinado produto plástico foi de fato proveniente de cadeias circulares.

Li et al (2020) tratam em sua pesquisa sobre a importância da remanufatura na promoção da economia circular – o papel é tão fundamental que na China foram consideradas como estratégia nacional, com maiores margens de lucro que a manufatura tradicional e possibilidade maior de geração de empregos.

O planejamento desses processos é altamente dependente de conhecimento técnico e experiência. Muito do que hoje se considera como consolidado foi

aperfeiçoado por tentativas e erros, e as etapas de melhoria demandam grande quantidade de tempo. Diversas empresas, principalmente de pequeno e médio porte (PME), não dispõem de todos os recursos necessários para a implementação dos métodos adequados para remanufatura. Ainda assim, o impacto das PME na indústria é significativo por conta de seu número, de modo que é de interesse geral apoiar o seu desenvolvimento.

Uma forma encontrada de criar sinergia no setor e reduzir custos de produção foi o compartilhamento de informações sobre remanufatura entre companhias. Nesse âmbito, *blockchain* foi escolhida como plataforma para gerenciamento seguro e descentralizado de dados. Os autores argumentam que a tecnologia seria um meio eficaz para trocas entre empresas interessadas em formar alianças, com menor risco de vazamento de informes confidenciais.

Na plataforma, as organizações primeiramente registrariam suas experiências em remanufatura – tipo de item, processo de transformação, equipamentos utilizados, requisitos técnicos, dentre outros. Um mecanismo de busca encontraria, através de filtros, casos semelhantes ao que se deseja tratar. Caso haja interesse, as empresas podem realizar “transações” desse caso utilizando os mecanismos já conhecidos de BC como chaves privadas e públicas. Ao fim do projeto, há possibilidade de oferecer *feedback* para o exemplo utilizado como referência, alimentando o ciclo de melhoria contínua. Relata-se também no artigo que um protótipo foi desenvolvido para verificar a viabilidade do sistema e do algoritmo de busca, com resultados favoráveis.

No campo dos plásticos, acredita-se que um sistema semelhante poderia ser implementado para compartilhar estratégias eficientes sobre reciclagem, reuso e design. Sabe-se que muito dos avanços em pesquisa e desenvolvimento são centralizados no setor privado, permanecendo isolado em empresas específicas por sua vantagem competitiva. Entretanto, os avanços em economia circular dependem de outras formas de relacionamento corporativo para que possam ter impacto significativo no meio ambiente e na sociedade.

Em seu trabalho, Liu, Zhang e Medda (2021) argumentam que os métodos tradicionais para lidar com resíduos plásticos não se mostraram suficientes para eliminá-los do meio ambiente. Uma das questões que contribuíram para esse fato é a falta de padronização nos rótulos que identificam os produtos, o que causa confusão e dificuldade na segregação correta de recicláveis.

Os autores acreditam que a clareza na identificação de produtos plásticos beneficiaria os consumidores, os quais teria maior embasamento para fazer escolhas. Aos poucos, a tendência seria que os plásticos com maior potencial de reciclagem ocupassem maior espaço de mercado, forçando os demais a reduzir suas aplicações. Para contornar a ambiguidade existente na rotulação, os pesquisadores propõem um sistema de crédito baseado na qualidade do plástico utilizado e em seu potencial de reciclagem.

Menciona-se no artigo que tais sistemas no Reino Unido são majoritariamente vinculados a uma entidade central, o que pode causar crises quando há assimetria de informações e fraudes. Cita-se também a experiência inglesa com o *Packaging Recovery Note System*, na qual tenta-se responsabilizar grandes companhias pelo plástico que utilizam obrigando-as a destinar suas embalagens a recicladores, os quais emitem notas como comprovante da troca. Entretanto, há casos em que empresas burlaram a normativa comprando os comprovantes sem ter feito a destinação correta de seus resíduos.

Nesse contexto, um dos maiores desafios à implementação do projeto foi apontado como a desconfiança existente entre consumidores, fabricantes de produto acabado e de polímeros. A necessidade de um instrumento descentralizado que pudesse gerar e checar as informações de crédito assegurando autenticidade das informações foi, portanto, um dos fatores decisivos para a escolha de *blockchain* como mais adequada.

Na cadeia privada da plataforma, chamada de PlasticChain, as companhias devem publicar fórmula, composição e quantidade de plástico utilizado, para que a nota de crédito seja calculada. A veracidade desses dados pode ser confirmada por seus parceiros de negócio através de contratos e auditorias. Na cadeia pública, somente as notas finais dos itens ficam disponíveis para consulta por parte dos consumidores. Entidades governamentais e recicladores podem se cadastrar posteriormente como auditores e verificadores das informações publicadas.

Os autores também mencionam alguns desafios que foram observados em um teste de performance das cadeias, um dos mais significativos sendo a redução na velocidade de processamento e maior propensão a falhas à medida em que a rede cresce. Apesar disso, acredita-se que o sistema de crédito poderia auxiliar na precificação de recursos, com aplicação de taxas para produtos que dificultassem a inserção de seus resíduos em outras cadeias produtivas.

A partir dos exemplos mencionados, percebe-se as aplicações de *blockchain* relacionadas à segurança apresentam interface com o tema de rastreabilidade, discutido na seção anterior. Outras aplicações são pertinentes à criação de confiabilidade em ambientes com vários agentes de interesses conflitantes, tornando-os mais propícios à colaboração e trocas.

4.4 CONTRATOS INTELIGENTES

Enquanto a primeira geração de *blockchain* teve como marco o Bitcoin, a segunda pode ser caracterizada pela habilidade de associar códigos customizados às transações. Esses códigos, aos quais se dá a denominação “contratos inteligentes”, são algoritmos que permitem a execução automática das cláusulas negociadas assim que suas exigências são atendidas. A plataforma Ethereum foi a primeira a viabilizar essa funcionalidade, com linguagem programável chamada Solidity (Arnold, 2019).

Nessa categoria, enquadram-se quatro trabalhos, os quais foram sumarizados no Quadro 6. Dentre os exemplos estudados, destaca-se o uso dos contratos no gerenciamento de resíduos e como instrumento para facilitar a escolha de fornecedores de materiais com menores impactos ambientais.

QUADRO 6 – APLICAÇÕES DE *BLOCKCHAIN* NA CATEGORIA CONTRATOS INTELIGENTES.

Autores	Proposta ou caso relatado	Item relacionado à estrutura ReSOLVE	País de afiliação dos autores
Petri et al (2020)	Uso de contratos inteligentes para facilitar transações de energia elétrica entre produtores independentes	Otimizar	Reino Unido
Shojaei (2019)	Emprego de <i>blockchain</i> na escolha de fornecedores de materiais sustentáveis para construção civil	Otimizar	Estados Unidos
Gupta e Bedi (2018)	Contratos inteligentes como ferramenta para gerenciamento de resíduos eletrônicos	Otimizar	Índia
Chidepatil et al (2020)	<i>Blockchain</i> como forma de otimizar negociações de material plástico reciclado	Otimizar, circular	Finlândia

FONTE: a Autora (2021).

Petri et al (2020) enfatizam em seu artigo a capacidade de *blockchain* de criar estratégias de compartilhamento através da interface direta entre usuários, permitindo maior flexibilidade de escolha para consumidores. Nesse contexto, produtores independentes que tenham alcançado a autossuficiência energética por meio de fontes renováveis e queiram vender o excedente poderiam fazê-lo utilizando contratos inteligentes.

Já Shonjaei (2019) aponta alguns desafios do setor de construção, como multiplicidade de agentes com interesses conflitantes e estrutura desordenada, os quais também foram associados ao setor de plásticos. Assim, o que se busca com o emprego de tecnologia é a maior confiança no meio e melhor gerenciamento de informações. Como os contratos inteligentes são traduções do acordo legal em códigos constituídos de lógicas do tipo “se/então”, ambas as partes são obrigadas a entender detalhadamente suas obrigações e direitos para redigi-lo, melhorando assim a visão do projeto e reduzindo desentendimentos. A execução automática das cláusulas também reduz conflitos por minimizar atrasos e incerteza em pagamentos.

O autor aponta que os contratos inteligentes também podem ser associados ao histórico dos itens utilizados na escolha de materiais mais sustentáveis para construção. Uma das condições para compra pode ser, por exemplo, a verificação de que o fornecedor possui certificado de matéria-prima verde. Para o setor de plásticos, isso representaria preferência por polímeros reciclados, biodegradáveis ou originados de fontes renováveis, como o polietileno de etanol da Braskem. No futuro, condições mais exigentes podem ser incluídas, como a de que o plástico apresente informações sobre método mais adequado de reuso, ou a garantia de que empresa participa efetivamente de cadeias circulares.

Em seu trabalho, Gupta e Bedi (2018) propõem o uso dos contratos como forma de regulamentação da coleta e reciclagem de resíduos eletroeletrônicos na Índia. No país existe uma normativa responsabilizando os produtores, importadores e revendedores pelos resíduos gerados, segundo a qual os agentes só podem manter licenças de funcionamento se comprovarem coleta de determinado volume de itens pós-consumo. Entretanto, a legislação não é cumprida na prática, e a grande maioria dos produtos descartados é absorvida pelo setor informal.

Um dos problemas citados quanto à dificuldade de fiscalização é a incerteza na contabilização dos itens que entraram no mercado e a qual produtor pertencem. Nesse caso, o projeto elaborado também consiste em associar os contratos

inteligentes à rastreabilidade dos materiais. Uma vez que cada item pode ser identificado e associado a uma marca e revendedor/importador específico, é possível atribuir a responsabilidade aos agentes corretos mesmo que ele seja retornado ou encontrado em um lugar diferente da compra.

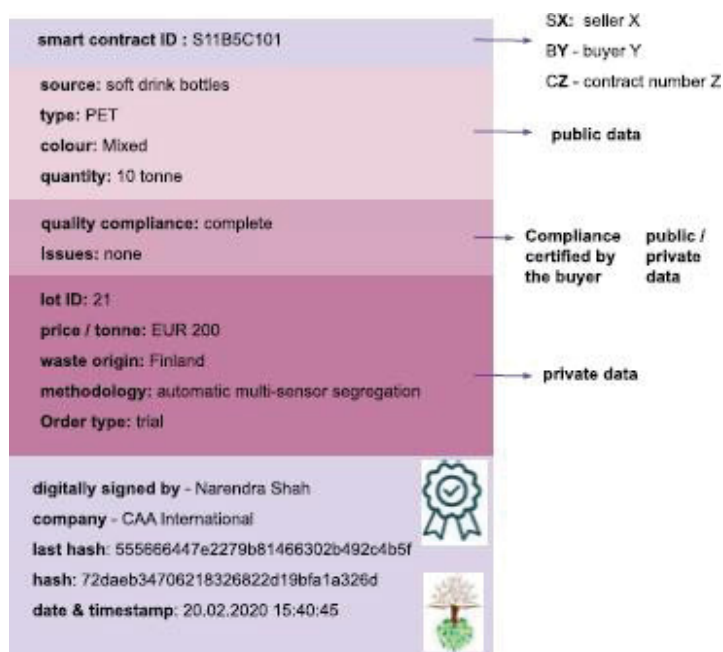
Dessa forma, torna-se mais fácil que as entidades governamentais confirmem se os volumes coletados atendem às especificações necessárias. Em caso positivo, o agente pode manter sua licença normalmente. Do contrário, o contrato inteligente automaticamente aplicaria multa ao infrator, com possibilidade de suspensão da operação. Com isso, aumenta-se a aderência à norma ambiental e reduz-se a possibilidade de que agentes tenham comportamentos antiéticos, em favor de benefícios pessoais. A mesma lógica poderia ser aplicada em relação ao cumprimento de estratégias de responsabilidade estendida do produtor, ou mesmo da PNRS no Brasil, a qual engloba também embalagens plásticas.

Por fim, Chidepatil et al (2020) tratam em seu artigo sobre projetos desenvolvidos pela empresa finlandesa *Radical Innovations Group*. Os autores argumentam que não somente o preço do plástico reciclado, mas também a falta de informações sobre qualidade e viabilidade para determinadas aplicações faz com que as empresas optem por matéria-prima nova. Nessa vertente, propõem otimizar a segregação de resíduos com sensores que captem dados sobre cores, formatos e composição físico-química dos itens.

Uma vez que esses dados foram levantados e registrados na *blockchain*, eles podem ser utilizados como base para negociações entre agentes. Os contratos inteligentes surgem então como instrumento para preservar a privacidade das informações, ao mesmo tempo em que garantem sua veracidade. No estudo, citam-se dois tipos de contrato: um entre segregadores de plástico e recicladores, e outro entre fornecedores de plástico reciclado e fabricantes de produto acabado.

Um exemplo de contrato foi disposto na Figura 5. nota-se que informações como preço acordado, metodologia de segregação e origem do material são mantidas privadas entre as partes interessadas. Outras, como tipo de material e quantidade, são públicas e disponíveis para validação dos aprovadores.

FIGURA 5 – EXEMPLO DE CONTRATO INTELIGENTE.



FONTE: CHIDEPATIL ET AL (2020).

Através dos exemplos citados, pode-se verificar algumas das possíveis aplicações dos contratos inteligentes na promoção da economia circular. Nota-se, principalmente por sua associação a outras funcionalidades de *blockchain*, que neste campo a ferramenta apresenta papel de suporte, não sendo frequentemente apresentada como o centro das pesquisas. Isso pode ser observado pelo menor número de artigos que a tem como enfoque principal, em comparação com os exemplos indicados nas seções anteriores.

Além disso, o pequeno número de casos também reflete o estágio inicial de desenvolvimento no qual os contratos inteligentes se encontram. Espera-se que com o amadurecimento da tecnologia surjam progressivamente mais exemplos práticos em complemento às propostas que foram apresentadas. Ainda assim, os contratos podem viabilizar projetos interessantes, e apresentam participação significativa no sucesso de *blockchain* - essa é a ferramenta por trás dos tokens oferecidos como incentivo à reciclagem de plásticos, por exemplo.

5. CONCLUSÃO

A partir do trabalho desenvolvido, foi possível perceber algumas das formas através das quais a emergente tecnologia de *blockchain* pode auxiliar na inserção de plásticos em outras cadeias produtivas após consumo, conforme premissas da economia circular. Nota-se, primeiramente, a existência de poucos artigos que tratem exatamente da junção entre os três temas citados – plásticos, *blockchain* e EC.

Entretanto, com as propostas e casos levantados, foi possível elaborar um panorama amplo do estado atual da tecnologia e suas aplicações mais promissoras, traçando paralelos com o segmento de polímeros. Considera-se, portanto, que a metodologia de revisão bibliográfica escolhida foi adequada para alcançar os objetivos previstos no início da pesquisa.

Ao longo da construção do texto, pode-se perceber que o interesse em BC como ferramenta de promoção da sustentabilidade vem crescendo ao longo dos anos, principalmente a partir de 2018. Atualmente, as aplicações que se encontram mais numerosas e desenvolvidas podem ser classificadas nos campos de traçabilidade e tokenização. Para os resíduos plásticos, isso se traduz no potencial de criação de estratégias de responsabilidade estendida do fabricante e históricos de produto que preservam informações ao longo de seu ciclo de vida, e no incentivo à correta segregação e reuso por parte dos consumidores.

Por conta da garantia de autenticidade de dados, o tema de traçabilidade encontra bastante interface com a classificação denominada segurança. Nesta categoria, também se destacam exemplos relacionados à prevenção de fraudes, o que pode ser utilizado posteriormente para garantir que um item foi de fato produzido a partir de material reciclado. Ademais, a procura e compra de produtos plásticos com menor impacto ambiental podem ser automatizados através de contratos inteligentes, os quais também viabilizam a emissão de *tokens*.

Adicionalmente, menciona-se que apesar de as propostas serem bastante promissoras, a tecnologia ainda se encontra em estágio inicial de maturidade quando se consideram campos relacionados à economia circular. A maioria dos casos apresentados refere-se à protótipos, e as organizações que desejam implementar projetos nesse âmbito encontram desafios como dificuldades na operacionalização em larga escala, falta de profissionais especializados e de interesse por parte do meio corporativo em criar redes de cooperação. Observa-se também que diversos autores

fazem menção ao apoio das instituições governamentais como fundamental na construção de soluções eficazes de amplo alcance.

Assim, sugere-se como pontos futuros de pesquisa que alguns dos protótipos citados – como o de incentivos à reuso e reciclagem – sejam replicados em maior escala e número no Brasil, a fim de entender as barreiras particulares do meio industrial brasileiro. O acesso à internet, apontado como ponto forte em testes piloto conduzidos na Europa, por exemplo, é um risco na realidade brasileira, marcada pela desigualdade. Outras aplicações, como as Análises de Ciclo de Vida, poderiam ser aplicados para itens de menor complexidade, também a fim de investigar problemas técnicos e propor soluções de melhoria.

6. REFERÊNCIAS

A WHOPPING 91% OF PLASTIC ISN'T RECYCLED. Disponível em: <https://www.nationalgeographic.org/article/whopping-91-percent-plastic-isnt-recycled/>. Acesso em: 27 de dezembro de 2020.

AJAWI-RAMCHANDANI, R., FIGUEIRA, S., OLIVEIRA, R., JHAR, S. Enhancing the circular and modified linear economy: the importance of blockchain for developing economies. **Resources, Conservation and Recycling**, v.16, 2021.

ANTELAVA, A., DAMILLOS, S., HAFEEZ, S., MANOS, G., AL-SALEM, S., SHARMA, B., KOHLI, K., COSTANTINUOU, A. Plastic solid waste (PSW) in the context of life cycle assessment (LCA) and sustainable management. **Environmental Management**, v. 64, p. 230-244, 2019.

ARNOLD, L., BRENNECKE, M., CAMUS, P., FRIDGEN, G., GUGGENBERGER, T., RADSZUWILL, S., RIEGER, A., SCHWEIZER, A., URBACH, N. Blockchain and initial coin offerings: blockchain's implication for crowdfunding. Business transformation through blockchain, vol I. Palgrave Macmillan, 2019.

ASTARITA, V., GIOFRÈ, V., MIRABELLI, G., SOLINA, V. A review of blockchain-based systems in transportation. **Information**, v. 11, 2020.

BELLINI, A., CHIANI, M., RUGGERI, A. Dematerialization of plastic demand by digital technologies. Technical Report, **Climate KIC and University of Bologna**, 2020.

BLOCKCHAIN TECHNOLOGY MOVES INTO CAR SHARING, MOBILITY SERVICES. Disponível em: <https://www.reuters.com/article/us-autos-blockchain-idUSKCN1BA1PH>. Acesso: em 27 de dezembro de 2020.

BÖCKEL, A., NUZUM, A., WEISSBROD. Blockchain for the circular economy: analysis of the research-practice gaps. **Sustainable Production and Consumption**, v. 25, 2021.

BRASIL. **Acordo setorial para implementação do sistema de logística reversa de embalagens em geral**. Disponível em: <https://sinir.gov.br/index.php/component/content/article/2-uncategorised/122-acordo-setorial-de-embalagens-em-geral>. Acesso em: 23 de dezembro de 2020.

CHIDEPATIL, A., BINDRA, P., KULKARMI, D., QAZY, M., KSHIRSAGAR, M., SANKARAN, K. From trash to cash: how blockchain and multi-sensor driver artificial intelligence can transform circular economy of plastic waste? **Administrative Sciences**, v. 10, 2020.

CLUCHET, P., KOSCINA, M., LOMBARD-PLATET, M. PlasticCoin: and ER20 implementation on Hyperledger Fabric for circular economy and plastic reuse. **International Conference on Web Intelligence**, 2019.

COALIZÃO EMBALAGENS. **Acordo setorial de embalagens em geral**, 2017. Relatório técnico. Disponível em: <https://www.coalizaoembalagens.com.br/acordo-setorial-acoes-e-resultados/>. Acesso em: 23 de dezembro de 2020.

D'AMBRIÈRES, W. Plastics recycling worldwide: current overview and desirable changes. **Field Actions Science Reports**, v. 19, p. 12-21, mar. 2019.

DEEP DIVE ON PLASTIC BANK'S BLOCKCHAIN. Disponível em: <https://insureblocks.com/ep-158-deep-dive-on-plastic-banks-blockchain/>. Acesso em: 05 de junho de 2021.

DIAGRAMA BORBOLETA: NO CAMINHO DA CIRCULARIDADE. Disponível em: <https://www.beecircular.org/post/borboleta>. Acesso em: 23 de dezembro de 2020.

DUTTA, P., CHOI, T., SOMANI, S., BUTALA, R. Blockchain technology in supply chain operations: applications, challenges and research opportunities. **Transportation Research Part E**, v. 142, 2020.

ESMAEILIAN, B., SARKIS, J., LEWIS, K., BEHDAD, S. Blockchain for the future of sustainable supply chain management. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 163, 2020.

FAIXÓ, F., CANÃDA, F. Driving municipal recycling by connecting digital value endpoints in smart cities. **Sustainability**, v. 12, 2020.

FAROOQUE, M., JAIN, V., ZHANG, A., LI, Z. Fuzzy DEMATEL analysis of barriers to blockchain-based life cycle assessment in China. **Computers & Industrial Engineering**, v. 147, 2020.

FRANÇA, A., NETO, J., GONÇALVES, R., ALMEIDA, C. Proposing the use of blockchain to improve the solid waste management in small municipalities. **Journal of Cleaner Production**, v. 244, 2020.

GENSLER, G. Blockchain basics and consensus. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=w7HDA8gUbpQ&t=3864s>. Acesso em: 27 de dezembro de 2020.

GENSLER, G. Blockchain basics and cryptography. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=0UvVOMZqpEA>. Acesso em: 27 de dezembro de 2020.

GENSLER, G. Blockchain basics, transactions, UTXO and script code. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=zGDTt9Q3vyM>. Acesso em: 27 de dezembro de 2020.

GOPALAKRISHNAN, P., RAMAGURU, R. Blockchain-based waste management. **International Journal of Engineering and Advanced Technology**, v. 8, p. 2632-2635, 2019.

GUARNIERI, P., CERQUEIRA-STREIT, J. A., BATISTA, L. C. Reverse logistics and the sectoral agreement of packaging industry in Brazil. **Resources, conservation and recycling**, v. 153, oct. 2019.

GUPTA, N., BEDI, P. E-waste management using blockchain-based smart contracts. **International Conference on Advances in Computing, Communications and Informatics**, 2018.

GUREWITSCH, S. et al. **Growth from within**. Ellen MacArthur Foundation, 2015. Technical report.

ISSAOUI, Y., KHIAT, A., BAHNASSE, A., OUAJJI, H. Smart logistics: study of the application of blockchain technology. **Procedia Computer Science**, 2019.

JABBOUR, A. B. L. S. et al. Circular economy business models and operations management. **Journal of Cleaner Production**, v. 235, p. 1525-1539, 2019.

JABBOUR, A. B. L. S., JABBOUR, C., FILHO, M., ROUBAUD, D. Industry 4.0 and the circular economy: a proposed research agenda and original roadmap for sustainable operations. **Annals of Operations Research**, v. 270, p. 273-286, 2018.

KAIJUN, L., YA, B., LINBO, J., HAN-CHIN, F., NIEUWEHUYSE, I. Research on agricultural supply chain system with double chain architecture based on blockchain technology. **Future Generation Computer Systems**, v. 86, 2018.

KATZ, D. Plastic bank: launching social plastic revolution. **Field Actions Science Reports**, v. 19, 2019.

KOSTYK, P., KUDRYASHOV, S., MADHWAL, Y., MASLOV, I., TKACHENKO, V. Blockchain-based solution to prevent plastic pipes fraud. **Seventh International Conference on Software Defined Systems**, 2020.

KOUHIZADEH, M. et al. Blockchain technology and its relationships to sustainable supply chain management. **International Journal of Production and Research**, v. 57, p. 2117-2135, oct. 2018.

KOUHIZADEH, M., ZHU, Q., SARKIS, J. Blockchain and the circular economy: potential tensions and critical reflections from practice. **Production and Control**, v. 31, p. 950-966, dec. 2019.

LACY, P. WAUGHTRY, D. **Harnessing the Fourth Industrial Revolution for the circular economy – consumer electronics and plastics packaging**. World Economic Forum, Geneva, 2019. Technical report.

LAURENCE, T. **Blockchain for dummies**. New Jersey: Wiley, 2017.

LENG, J., RUAN, G., JIANG, P., XU, K., ZHOU, X., LIU, C. Blockchain-empowered sustainable manufacturing and product lifecycle management in industry 4.0: a survey. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 132, 2020.

LI, S., ZHANG, H., YAN, W., JIANG, Z. A hybrid method of blockchain and case-based reasoning for remanufacturing process planning. **Journal of Intelligent Manufacturing**, v. 32, p.1389-1399, 2020.

LIU, C., ZHANG, X., MEDDA, F. Plastic credit: a consortium blockchain-based plastic recyclability system. **Waste Management**, v. 121, 2021.

MORLET, A. et al. **The new plastics economy – rethinking the future of plastics**. World Economic Forum, Ellen MacArthur Foundation and McKinsey & Company, 2016. Technical report.

NAKAMOTO, S. Bitcoin: a peer-to-peer electronic cash system. 2009.

NARAYAN, R., TIDSTRÖM, A. Tokenizing coopetition in a blockchain for a transition to circular economy. **Journal of Cleaner Production**, v. 26, 2020.

PALETTA, A. et al. Barriers and challenges to plastics valorization in the context of a circular economy: case studies from Italy. **Journal of Cleaner Production**, v. 241, p. 118-149, 2019.

PELLEGRINI, L., CAMPI, S., LOCATELLI, M., PATTINI, G. Digital transition and waste management in architecture, engineering, construction and operations industry. **Frontiers in Energy Research**, 2020.

PELONERO, L., FORNAIA, A., TRAMONTANA, E. A blockchain handling data in a waste recycling scenario and fostering participation. **Second International Conference on Blockchain Computing and Applications**, 2020.

PETRI, I., BARATI, M., REZGUI, Y., RANA, O. Blockchain for energy sharing and trading in distributed prosumer communities. **Computers in Industry**, v. 123, 2020.

PLASTICS MARKET SIZE, SHARE AND TRENDS ANALYSIS. Disponível em: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/global-plastics-market>. Acesso em: 22 de dezembro de 2020.

PLASTICS. Disponível em: <https://www.chemicalsafetyfacts.org/plastics/>. Acesso em: 23 de dezembro de 2020.

PREÇO DE CRIPTOMOEDAS. Disponível em: <https://www.coinbase.com/pt/price>. Acesso em: 27 de dezembro de 2020.

RAYNAUD, J. **Valuing plastics: the business case for measuring and disclosing plastic use in the consumer goods industry**. United Nations Environment Programme, 2014. Technical report.

SABERI, S., KOUHIZADEH, M., SARKIS, J. Blockchain technology: a panacea or pariah for resource conservation and recycling? **Resources, Conservation and Recycling**, v. 130, 2018.

SANKARAN, K. Carbon emission and plastic pollution: how circular economy, blockchain and artificial intelligence support the transition? **Journal of Innovation Management**, v. 4, 2019.

SEKHRI, P. Harvesting the plastic we sowed: costs and challenges in a novel application of blockchain for implementing extended producer responsibility in Chile. Master thesis, **The Massachusetts Institute of Technology**, 2018.

SHAKHBULATOV, D., ARORA, A., DONG, Z., CESSA, R. Blockchain implementation for analysis of carbon footprint across food supply chain. **IEEE International Conference of Blockchain**, 2019.

SHOJAEI, A. Exploring applications of blockchain technology in the construction industry. **Proceedings of International Structural Engineering and Construction**, 2019.

THE FUTURE OF MANUFACTURING: FROM LINEAR TO CIRCULAR. Disponível em: <https://blogs.berkeley.edu/2014/02/24/the-future-of-manufacturing-from-linear-to-circular-2/>. Acesso em: 23 de dezembro de 2020.

TOZANLI, O., KONGAR, E., GUPTA, S. Trade-in-to-upgrade as a marketing strategy in disassembly-to-order systems at the edge of blockchain technology. **International Journal of Production Research**, v. 58, p. 7183-7200, 2020.

TRANFIELD, D., DENYER, D., SMART, P. Towards a methodology for developing evidence-informed management knowledge by means of systematic review. **British Journal of Management**, v. 14, p. 207-222, 2003.

TSENG, M., TAN, R., CHIU, A., CHIEN, C., KUO, T. Circular economy meets industry 4.0: can big data drive industrial symbiosis? **Resources, conservation and recycling**, v.131, p.146-147, 2018.

UPADHYAY, A., MUKHUTY, S., KUMAR, V., KAZANCOGLU, Y. Blockchain technology and the circular economy: implications for sustainability and social responsibility. **Journal of Cleaner Production**, v. 293, 2021.

WANG, B., LUO, W., ZHANG, A., TIAN, Z., LI, Z. Blockchain-enables circular economy supply chain management: a system architecture for fashion. **Computers in Industry**, v. 123, 2020.

WANG, B., XU, Z., TAN, X., JU, M., YANG, J. Evaluation and recovery of power batteries based on trusted blockchain traceability. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, 2019.

WARREN, S. et al. **Blockchain beyond the hype – a practical framework for leaders**. World Economic Forum, Geneva, 2018. Technical report.

WARREN, S. et al. **Inclusive deployment of blockchain for supply chains – Part I**. World Economic Forum, Geneva, 2019. Technical report.

WAUTELET, T. Exploring the role of independent retailers in the circular economy: a case study approach. Thesis (Master of Business Administration), European University for Economics and Management, Luxembourg, 2018.

WHAT ARE PLASTICS? Disponível em: <https://www.plasticseurope.org/en/about-plastics/what-are-plastics>. Acesso em: 22 de dezembro de 2020.

WHAT ARE THE DIFFERENT TYPES OF PLASTIC? Disponível em: <https://www.qualitylogoproducts.com/promo-university/different-types-of-plastic.htm>. Acesso em: 22 de dezembro de 2020.

WHAT IS BLOCKCHAIN? Disponível em: <https://www.stefanjunestrand.com/blog/what-is-blockchain/>. Acesso em: 28 de dezembro de 2020.

WHAT IS CIRCULAR ECONOMY? Disponível em: <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/circular-economy/what-is-the-circular-economy>. Acesso em: 22 de dezembro de 2020.

WU, H., SU, Y., HU, W. A study on blockchain-based circular economy credit rating system. **Journal of Internet Technology**, v. 20, p.947-954, 2019.

YAGA, D. et al. **Blockchain technology overview**. National Institute of Standards and Technology, 2018. Technical report.

ZHANG, A., ZHONG, R., FAROOQUE, M., VENKATESH, K. Blockchain-based life cycle assessment: an implementation framework and system architecture. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 152, 2020.