

THOMAZ HENRIQUE VIARO BRIDI

**APLICAÇÃO DE ORGANIZAÇÕES AUTÔNOMAS
DESCENTRALIZADAS NA RECICLAGEM DE RESÍDUOS
ELETROELETRÔNICOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Paulista – UNIP, para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção.

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Franco Gonçalves

SÃO PAULO

2025

Bridi, Thomaz Henrique Viaro.

Aplicação de organizações autônomas descentralizadas na reciclagem de resíduos eletroeletrônicos / Thomaz Henrique Viaro Bridi. – 2025.

61 f. : il. color. + CD-ROM.

Dissertação de Mestrado Apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Paulista, São Paulo, 2025.

Área de concentração: Gestão de Sistemas de Operação.

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Franco Gonçalves.

1. *Blockchain*. 2. Contrato inteligente. 3. Economia circular. 4. Gestão de resíduos sólidos. 5. Lixo eletrônico. I. Gonçalves, Rodrigo Franco (orientador). II. Título.

Ficha elaborada pelo Bibliotecário Rodney Eloy CRB8-6450

THOMAZ HENRIQUE VIARO BRIDI

**APLICAÇÃO DE ORGANIZAÇÕES AUTÔNOMAS DESCENTRALIZADAS NA
RECICLAGEM DE RESÍDUOS ELETROELETRÔNICOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Paulista – UNIP, para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção.

Aprovado em: ____/____/____

BANCO EXAMINADORA

Prof. Dr. Rodrigo Franco Gonçalves
Universidade Paulista – UNIP

Profª. Dra. Ana Lucia Figueiredo Facin
Universidade Paulista – UNIP

Prof. Dr. Maciel Manoel de Queiroz
Fundação Getulio Vargas – FGV

DEDICATÓRIA

Dedico esse trabalho aos meus pais pelo afeto e pela coragem de investir em um filho, assim como a todas as pessoas cujos nomes se perderam em minha memória, menos suas ações que me trouxeram até aqui.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família, cujos amor e esforço foram de grande incentivo para minhas atividades acadêmicas.

Agradeço ao corpo administrativo e docente da Universidade Paulista, com destaque especial ao Prof. Dr. Rodrigo Franco Gonçalves, cuja experiência, cujos conselhos construtivos e suporte foram fundamentais na elaboração dessa dissertação.

Agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, pois este trabalho foi realizado como o seu apoio.

EPÍGRAFE

“A humanidade sempre sabe mais o que deve, mas nunca tudo o de que precisa.”

Prof. Dr. Luiz Felipe Pondé

RESUMO

O volume crescente de resíduos eletroeletrônicos (REs) é um desafio global que exige soluções inovadoras e sustentáveis. Todavia, políticas e técnicas para gestão de REs são intrinsicamente complexas, com ineficácias no descarte e na recuperação de matérias-primas valiosas. Nesse contexto, essa dissertação avalia a aplicabilidade do modelo de Organizações Autônomas Descentralizadas (DAOs) no desenvolvimento de soluções técnicas inovadoras na reciclagem de REs. Essa avaliação é composta por três dimensões: governança organizacional, problemas empíricos e regulatórios e viabilidade técnica, e cada uma destas dimensões é explorada por um dos três artigos de pesquisa que compõem esse trabalho. Primeiramente, desenvolve-se um *framework* conceitual sobre a estrutura de governança comunitária em DAOs. Em segunda instância, identificam-se fatores estratégicos sobre a aplicação da tecnologia *blockchain* em sistemas para logística reversa de REs. Em terceiro momento, avalia-se a viabilidade técnica da implementação de uma DAO destinada ao controle da geração de REs e à reinserção de matérias-primas na cadeia produtiva pela reciclagem. O modelo organizacional de DAOs pode oferecer benefícios à descentralização de informações e à participação ativa de *stakeholders* na gestão de Res. A avaliação demonstra como é promissora a aplicação de DAOs nas soluções técnicas para a reciclagem de REs. Porém, também se indica que a implementação bem-sucedida de uma DAO nesse contexto ainda possui desafios, como questões legais, limitações técnicas de ferramentas de *blockchain* disponíveis e custos elevados de processamento de dados.

Palavras-chave: Blockchain. Contrato Inteligente. Economia Circular. Gestão de Resíduos Sólidos. Lixo Eletrônico.

ABSTRACT

The growing volume of electronic waste (EW) is a global challenge that requires innovative and sustainable solutions. However, policies and techniques for EW management are intrinsically complex, with inefficiencies in the disposal and recovery of valuable raw materials. In this context, this dissertation evaluates the applicability of the Decentralized Autonomous Organizations (DAOs) model in the development of innovative technical solutions for EW recycling. This evaluation is composed of three dimensions: organizational governance, empirical and regulatory problems, and technical feasibility, and each of these dimensions is explored by one of the three research articles that make up this work. First, a conceptual framework on the community governance structure in DAOs is developed. Second, strategic factors in the application of blockchain technology in EW reverse logistics systems are identified. Third, the technical feasibility of implementing a DAO aimed at controlling EW generation and reinserting raw materials into the production chain through recycling is assessed. The DAO organizational model can offer benefits to the decentralization of information and the active participation of stakeholders in the management of EW. The evaluation demonstrates how promising the application of DAOs is in technical solutions for EW recycling. However, it also indicates that the successful implementation of a DAO in this context still has challenges, such as legal issues, technical limitations of available blockchain tools, and high data processing costs.

Keywords: Blockchain. Smart Contract. Circular Economy. Solid Waste Management. Electronic Waste.

LISTA DE ABREVIACÕES E SIGLAS

DAC	<i>Decentralized Autonomous Corporation</i>
DAO	<i>Decentralized Autonomous Organization</i>
EC	Economia Circular
GRE	Gestão de Resíduos Eletroeletrônicos
GRS	Gestão de Resíduos Sólidos
RE	Resíduos Eletroeletrônico
SC	<i>Smart Contract</i>
SWOT	<i>Strengths, Weaknesses, Opportunities, and Threats</i>

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Estimativa da geração de resíduos eletroeletrônicos anualmente entre os anos de 2018 e 2060.	15
Figura 2 – Representação visual da relação entre o objetivo geral dessa dissertação e seus objetivos específicos desenvolvidos nos artigos que compõem este trabalho.....	20
Figura 3 – Representação dos arcos da economia circular no fluxo linear de produção e consumo.....	21
Figura 4 – Fluxo da reciclagem de resíduos eletroeletrônicos em um fluxo econômico linear.	22
Figura 5 – Representação de uma rede blockchain na qual computadores realizam o processo de validação das transações compartilhadas e armazenam o histórico de transações em lotes sequenciais denominados blocos.	23
Figura 6 – Composição de contratos inteligentes e a representação de interações entre participantes da rede e outros contratos.....	24
Figura 7 – Modelo conceitual da arquitetura de uma DAO.	26

UTILIDADE

No contexto da reciclagem de resíduos eletroeletrônicos, o modelo de Organizações Autônomas Descentralizadas, sustentado pela tecnologia *blockchain* e contratos inteligentes, pode viabilizar soluções técnicas para facilitar, incentivar e monitorar o descarte, a reciclagem e a reinserção de matérias-primas provenientes desses resíduos no ciclo produtivo.

Tais soluções também podem oferecer meios de colaboração entre produtores e consumidores na gestão do ciclo de vida de produtos eletroeletrônicos, o que promoveria um mercado mais sustentável sobre a perspectiva de um modelo econômico circular.

Tomando como referência os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da Organização das Nações Unidas, essa dissertação traz contribuições relacionadas aos quatro objetivos seguintes:

- **Objetivo 8: Trabalho Digno e Crescimento Econômico**, por explorar soluções técnicas que, em futuras implementações, podem possibilitar a criação de vínculos empregatícios mais dignos para coletores de resíduos e a força de trabalho no setor de reciclagem;
- **Objetivo 9: Indústria, Inovação e Infraestrutura**, por desenvolver o potencial da tecnologia *blockchain*, o que promove a inovação na gestão de resíduos e possibilita uma rede de coleta e reciclagem mais eficaz;
- **Objetivo 11: Cidades e Comunidades Sustentáveis**, por explorar soluções técnicas capazes de oferecer mecanismos de incentivo a hábitos responsáveis de reciclagem, o que reduz o extrativismo e a dependência aos aterros e lixões;
- **Objetivo 12: Consumo e Produção Responsáveis**, por possibilitar, em futuras implementações, mecanismos de controle da geração de resíduos provenientes do consumo e direcioná-los a um fluxo circular para reinserção de matérias-primas.

SUMÁRIO

CAPÍTULO I.....	15
1 INTRODUÇÃO.....	15
1.1 Contexto e problematização	15
1.2 Objetivos da pesquisa	18
1.2.1 Objetivo geral	18
1.3 Delimitações	18
1.4 Justificativa.....	19
1.5 Composição dessa dissertação.....	19
CAPÍTULO II.....	21
2 REFERENCIAL TEÓRICO.....	21
2.1 Economia circular.....	21
2.2 Gestão de resíduos eletroeletrônicos	22
2.4 Tecnologia <i>blockchain</i>	23
2.5 Contratos inteligentes	24
2.6 Organizações autônomas descentralizadas	25
CAPÍTULO III	27
3 MÉTODOS DE PESQUISA	27
3.1 Métodos aplicados no Artigo I	27
3.2 Métodos aplicados no Artigo II.....	27
3.3 Métodos aplicados no Artigo III.....	28
CAPÍTULO IV	29
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	29
4.1 Resultados e discussões do Artigo I	29
4.2 Resultados e discussões do Artigo II.....	30
4.3 Resultados e discussões do Artigo III	30
CAPÍTULO V	33
5 CONCLUSÕES.....	33
5.1 Reflexões e integrações dos resultados	33
5.2 Continuidade da pesquisa	34
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	35
APÊNDICE A – ARTIGO I.....	43
APÊNDICE B – ARTIGO II.....	65

APÊNCIDE C – ARTIGO III.....	81
APÊNDICE D – REGISTRO DE SOFTWARE	107

CAPÍTULO I

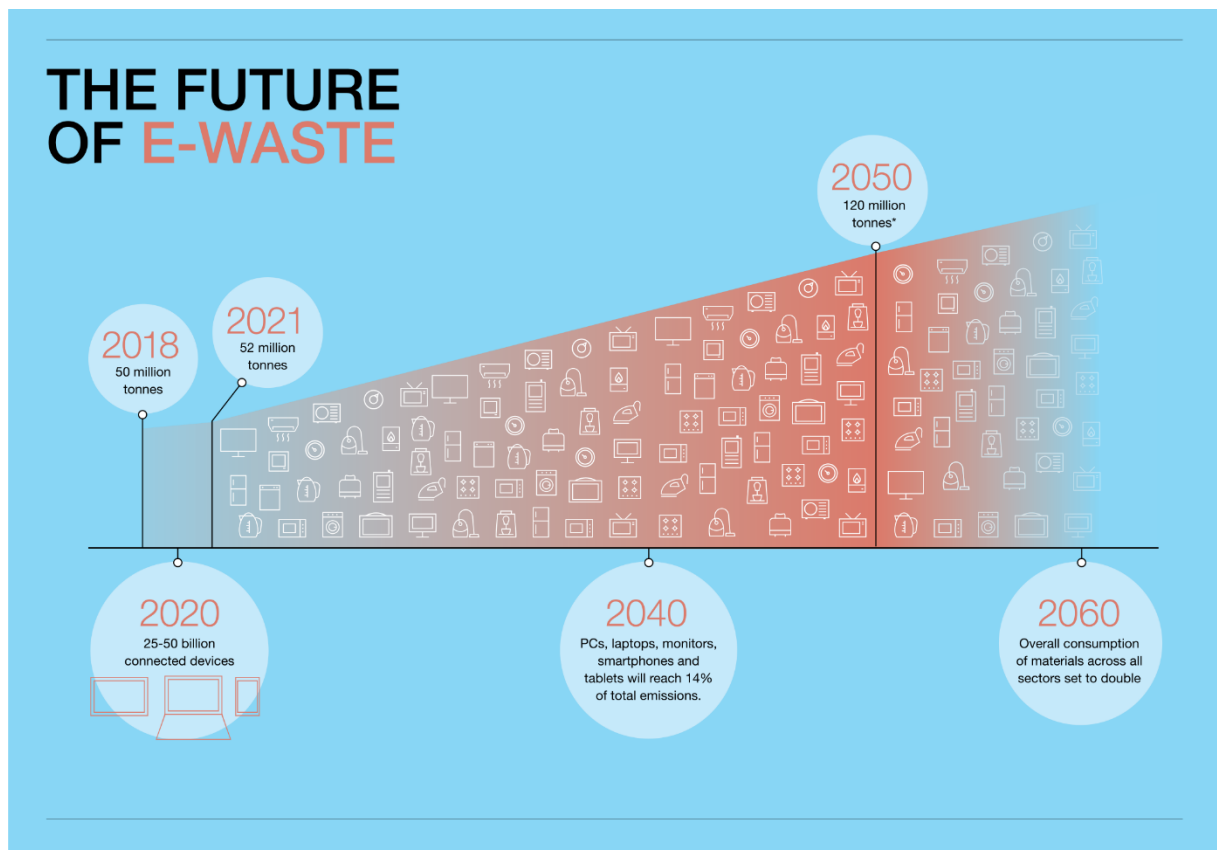
1 INTRODUÇÃO

1.1 Contexto e problematização

O desenvolvimento tecnológico acelerado e o consumo contínuo de dispositivos eletroeletrônicos acarretam a geração crescente de resíduos eletroeletrônicos (REs). Conforme apontado por Dasaklis *et al.* (2020), a gestão desses resíduos implica desafios além do contexto da sustentabilidade, visando também a reduzir impactos socioeconômicos negativos.

O modelo de economia linear prevalecente no mercado de tecnologia atual caracteriza-se pelo extrativismo de matérias-primas finitas e por impactos ambientais negativos. Conforme exposto em um relatório do *World Economic Forum* (2019) e ilustrado na Figura 1, estima-se que o volume de REs gerado anualmente seja de 120 milhões de toneladas em 2050.

Figura 1 – Estimativa da geração de resíduos eletroeletrônicos anualmente entre os anos de 2018 e 2060.



Fonte: Relatório do *World Economic Forum* (2019).

Como exemplificado por Minter (2016), a fabricação de uma tonelada de computadores portáteis resulta na emissão aproximada de 10 toneladas de dióxido de carbono. Belkhir e Elmeligi (2018) também apontam que as emissões de gases de efeito estufa, provenientes da

fabricação e do consumo de produtos eletroeletrônicos pessoais, atingirão 14% das emissões até 2040.

Segundo dados levantados por Baldé *et al.* (2017), a taxa global média de reciclagem de REs é de apenas 20% e, segundo Mihai e Gnoni (2016), apesar de o comércio internacional de REs ser regulamentado pela Convenção de Basileia, esses resíduos são comumente exportadas para países subdesenvolvidos para serem desmontados ou queimados como meios de eliminação.

Apesar do crescente reconhecimento da importância da gestão dos resíduos sólidos urbanos, ainda persistem muitos desafios, especialmente em países subdesenvolvidos. Uma parte continua a ser depositada em aterros sanitários a céu aberto (URBAN; NAKADA, 2021).

Como apontado por Korhonen *et al.* (2018), vários países possuem ou visam a desenvolver políticas de gestão de REs, criando estratégias que envolvem a redução da produção de resíduos, de coleta, de reciclagem e incentivos por um modelo econômico circular. Todavia, conforme Sahoo e Halder (2020), é esperado que políticas governamentais não sejam plenamente eficazes devido à complexidade intrínseca nessa gestão.

Tendo em mente essa problematização e na perspectiva de soluções tecnológicas emergentes na Indústria 4.0, o modelo empresarial de Organizações Autônomas Descentralizadas (DAOs), derivado da tecnologia de *blockchain* e contratos inteligentes, pode ser a base de soluções de automatização, de descentralização dos processos e de mecanismos para incentivo socioeconômico na gestão de REs.

A tecnologia *blockchain* pode ser descrita como um livro-razão distribuído que possibilita a criação de sistemas para registro de transações imutáveis de maneira sequencial (DWIVEDI *et al.*, 2021; ELLINGER *et al.*, 2023; MOUGAYAR, 2017). O termo “*blockchain*” deriva da estrutura de dados utilizada no armazenamento persistente (PACHECO, 2019).

Os contratos inteligentes, conforme definido por Liu *et al.* (2020), é um programa computacional publicado em uma rede *blockchain* e capaz de realizar tarefas automatizáveis e armazenar dados de forma segura e distribuída.

A tecnologia *blockchain* e os contratos inteligentes permitiram o surgimento de um novo modelo organizacional. Sendo parte da chamada Revolução Cripto-Tecnológica, o modelo organizacional de DAOs representa uma ruptura paradigmática nas formas tradicionais de organizações humanas centralizadas e hierarquizadas (KUTSYK; REDCHENKO; VORONKO, 2020).

Conforme Wang *et al.* (2019a), o modelo de DAO pode ser descrito como uma organização digital, cujos processos são realizados e geridos sob uma rede *blockchain* por meio

de automações via programas computacionais, utilizando protocolos de consenso distribuído e uma economia baseada em *tokens* digitais.

O modelo de DAO oferece uma alternativa à estrutura organizacional centralizada e hierarquizada, o que sugere uma estrutura de autonomia comunitária, na qual decisões e operações são tomadas por meios democráticos entre os *stakeholders* da organização (HASSAN; DE FILIPPI, 2021; WANG *et al.*, 2022).

As capacidades da tecnologia *blockchain*, como descentralização, imutabilidade e transparência, a tornam promissora como base de soluções para gerenciamento de REs, fato que possibilita funcionalidades de rastreabilidade de resíduos e matérias-primas, mecanismos de incentivos socioeconômicos para reciclagem e redes de coleta descentralizadas (ALAROOD *et al.*, 2023; IEEE, 2021).

O modelo de DAOs permite a tomada de decisões coletivas sem a necessidade de uma autoridade centralizada, assentindo que organizações dessa natureza possam facultar governança voltada para a comunidade, iniciativas de economia circular e operações mais transparentes na gestão de REs (AUGUSTIN; ECKHARDT; DE JONG, 2023; SHYAMALATHA; MUTHULAKSHMI; RITHICK, 2020).

Na literatura acadêmica, encontram-se propostas de soluções para gestão REs habilitadas pela tecnologia *blockchain* e modelos de DAO implementados por meio de contratos inteligentes. O fato oferece funções de rastreamento, de coleta, de monitoramento e logística. Alguns estudos também integram ferramentas adicionais, como dispositivos, sensores e aplicativos móveis.

Gupta e Bedi (2018) propõem o uso de contratos inteligentes para coordenação entre produtores, importadores, varejistas e recicladores de produtos eletroeletrônicos. Sahoo e Halder (2020) implementam uma solução de logística reversa de REs em linguagem *Solidity* na plataforma *Ethereum*.

Farizi e Sari (2021) desenvolvem um aplicativo *Android* para localização de pontos de coleta de Res, empregando a *Hyperledger Fabric* como instância de uma rede *blockchain*. Khan e Ahmad (2022) e Ping *et al.* (2024) propõem soluções técnicas habilitadas por *blockchain* e Internet das Coisas para rastreamento de REs em tempo real.

Ambre e Trivedi (2024) utilizam contratos inteligentes para customizar operações de coleta de REs, enquanto Arumugam *et al.* (2024) discorrem sobre a integridade de registros sobre transações de descarte e coleta.

A maioria das publicações apresenta sistemas conceituais, sem uma implementação real prática, com exceção dos trabalhos de Sahoo e Halder (2020) e Farizi e Sari (2021). Os autores

também discorrem sobre alguns desafios encontrados, como a codificação de contratos inteligentes, a garantia de conformidade dos dados, o equilíbrio de interesses entre os *stakeholders* e a escalabilidade de seus projetos.

Tendo em mente as capacidades oferecidas pela tecnologia *blockchain*, o modelo de DAOs e as poucas implementações práticas dessas tecnologias no contexto da gestão de REs, a questão de pesquisa que orienta essa dissertação é: “Como DAOs podem contribuir para a gestão de REs, com foco em sua reciclagem, promovendo a circularidade das matérias-primas?”

1.2 Objetivos da pesquisa

1.2.1 Objetivo geral

Essa dissertação visa a avaliar a aplicabilidade do modelo de DAO no desenvolvimento de soluções técnicas inovadoras na reciclagem de REs. Essa avaliação se estrutura em torno de três dimensões: governança organizacional, problemas empíricos e legislação e viabilidade técnica. Cada uma dessas dimensões é explorada por um dos três artigos que compõem esse trabalho.

1.2.2 Objetivos específicos

A partir do objetivo geral deste trabalho e das dimensões da avaliação, desdobram-se três objetivos específicos, os quais atendem as três dimensões da avaliação. São eles:

1. Sobre a dimensão de governança organizacional, desenvolver um *framework* conceitual sobre a estrutura de governança comunitária em DAOs;
2. Sobre a dimensão de problemas empíricos e legislação, identificar fatores estratégicos sobre a aplicação de *blockchain* em sistemas para logística reversa de REs;
3. Sobre a dimensão de viabilidade técnica, avaliar a viabilidade técnica da implementação de uma DAO destinada ao controle da geração de REs e à reinserção de matérias-primas na cadeia produtiva pela reciclagem.

1.3 Delimitações

Essa dissertação delimita-se à tecnologia *blockchain* e ao modelo organizacional de DAO no contexto da gestão de REs. Ela aborda especificamente os seguintes tópicos:

- Fundamentos técnicos de *blockchain*, especificamente sob o protocolo *Ethereum* e suas funcionalidades de armazenamento e processamento distribuído, mecanismos de consenso e capacidades funcionais de contrato inteligente codificados em *Solidity*;

- O modelo de DAO enquanto uma estrutura organizacional sustentada pela tecnologia *blockchain*, regida por contratos inteligentes, cujo contexto é de atuação na reciclagem de REs;
- Em processos e sistemas de informação na gestão de REs relacionadas ao descarte, coleta e reciclagem desses resíduos.

1.4 Justificativa

DAOs proporcionam uma abordagem inovadora para iniciativas de gestão de REs, introduzindo transparência, rastreabilidade, incentivo aos agentes envolvidos e oferecendo possíveis soluções aos problemas de descarte inadequado e as baixas taxas de reciclagem de REs.

A tecnologia *blockchain* permite rastrear produtos e garantir um descarte ambientalmente correto, enquanto contratos inteligentes podem automatizar mecanismos de incentivo para reciclagem e facilitar a participação ampla de pessoas e organizações, promovendo um modelo econômico circular onde indivíduos se tornam participantes ativos.

DAOs podem viabilizar uma economia circular para produtos eletrônicos, criando confiança entre diversos agentes e promovendo o crescimento econômico sustentável por meio da recuperação de matérias-primas valiosas via reciclagem.

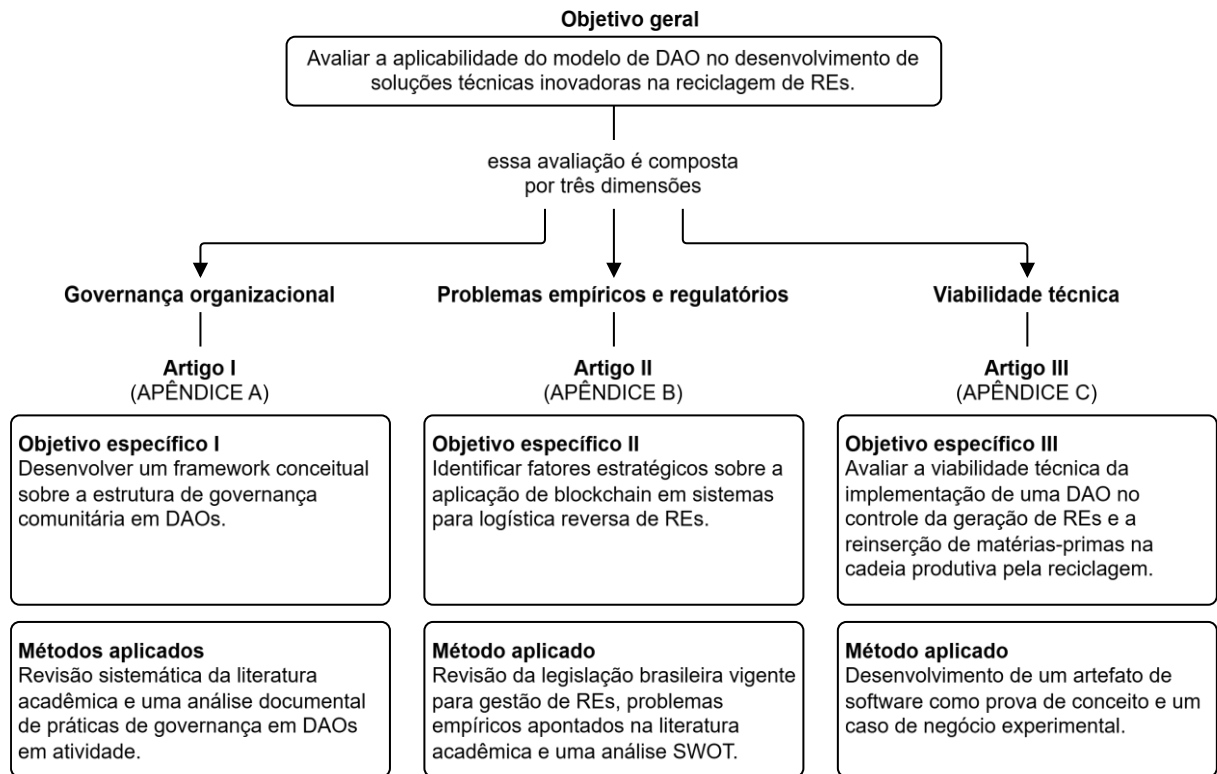
Além disso, a aplicação de DAOs não apenas pode oferecer soluções na gestão de REs como também ter aplicações mais amplas num modelo econômico circular, incentivando um maior envolvimento da sociedade e um paradigma econômico mais sustentável.

1.5 Composição dessa dissertação

A Figura 2 representa a relação entre o objetivo geral, os objetivos específicos e os artigos nesse trabalho.

Essa dissertação está organizada em cinco capítulos. O primeiro capítulo apresenta informações introdutórias; o segundo apresenta o referencial teórico dos conceitos abordados; o terceiro descreve resumidamente os métodos aplicados; o quarto apresenta resumidamente os resultados de cada; o quinto capítulo expõe as conclusões e as sugestões para estudos futuros sobre o tema.

Figura 2 – Representação visual da relação entre o objetivo geral dessa dissertação e seus objetivos específicos desenvolvidos nos artigos que compõem este trabalho.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

CAPÍTULO II

2 REFERENCIAL TEÓRICO

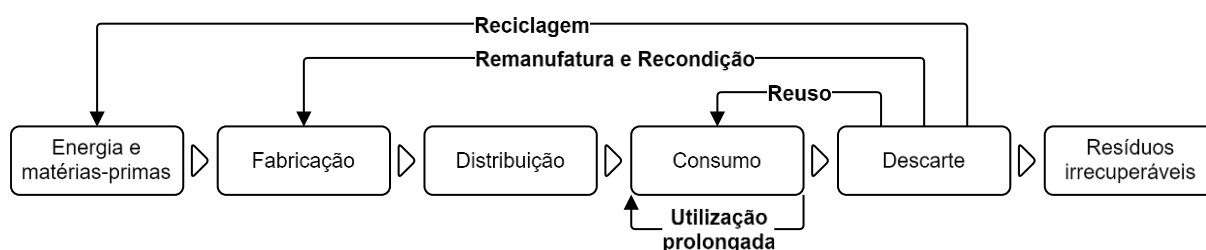
2.1 Economia circular

Conforme Kutschke *et al.* (2016), o conceito de Economia Circular (EC) está associado a várias escolas de pensamento. É ainda uma das principais teorias fundantes do conceito de Ecologia Industrial com foco no estudo de fluxos energéticos e de matérias-primas através de sistemas industriais.

Kirchherr *et al.* (2017) descreve que o conceito de EC propõe um sistema de produção e consumo em que os materiais e os componentes são mantidos no seu valor mais elevado o quanto possível, e os resíduos são eficientemente recuperados.

Conforme Geissdoerfer *et al.* (2020) e ilustrado na Figura 3, a EC enfatiza a longevidade de produtos e a otimização dos recursos, promovendo uma abordagem cíclica em que produtos e materiais, além de serem projetados para uso prolongado, são concebidos com a intenção de reuso, recondicionamento e reciclagem.

Figura 3 – Representação dos arcs da economia circular no fluxo linear de produção e consumo.



Fonte: adaptado de Geissdoerfer *et al.* (2020).

Segundo Ellen Macarthur Foundation (2019), a transição para um modelo de EC envolve uma mudança estratégica de redução da dependência de matérias-primas virgens. Ela incorpora uma proporção maior de insumos recuperados na cadeia produtiva. Essa transformação oferece vantagens distintas para empresas, mitigando riscos associados a eventos naturais, à flutuação dos preços ou a instabilidades geopolíticas.

Sob o contexto da Indústria 4.0 e sob a perspectiva de novas tecnologias emergentes, Kristoffersen *et al.* (2020) descrevem que a EC recebeu uma nova vertente denominada Economia Circular Digital ou Economia Circular Inteligente. Seu foco está em soluções digitais e no controle e na análise facilitados por tecnologias, como aprendizado de máquina, *big data*, *blockchain*, internet das coisas, dentre outras tecnologias.

2.2 Gestão de resíduos eletroeletrônicos

Resíduos eletroeletrônicos (REs) consistem em uma ampla variedade de dispositivos de uso industrial ou pessoal descartados por não estarem aptos para uso. A reciclagem de REs é vista como um dos tópicos da Gestão dos Resíduos Sólidos (GRS), a qual engloba a coleta, o tratamento e a eliminação de resíduos sólidos, buscando formas eficazes e sustentáveis.

Como discorrido por Abubakar *et al.* (2022), a GRS é uma preocupação central no planejamento urbano contemporâneo e na governação ambiental. Os principais objetivos da GRS é minimizar a produção de resíduos, promover a conservação dos recursos e atenuar impactos socioambientais negativos.

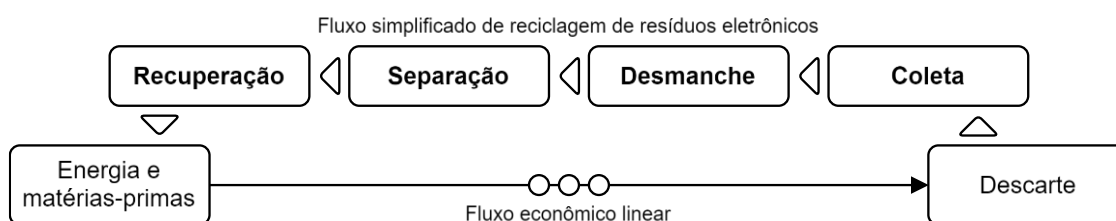
Todavia, como discorrido por Urban e Nakada (2021), apesar do crescente reconhecimento da importância da GRS, principalmente em centros urbanos, ainda persistem vários desafios. Em países não desenvolvidos, uma parte significativa dos resíduos sólidos urbanos continua a ser depositada em aterros sanitários a céu aberto.

Para enfrentar estes desafios, é necessária uma abordagem multifacetada que envolva uma combinação de medidas políticas, tecnológicas e interesse público. Como descrito por Baralla *et al.* (2023), a GRS constitui um sistema intrincado de processos nos quais diversos atores sociais e institucionais inter-relacionam-se numa dinâmica de interesses comuns.

Como parte da GRS, há uma especificidade para REs, a Gestão de Resíduos Eletroeletrônicos (GRE). Segundo um relatório da *International Telecommunication Union* (2017), 67 países possuem alguma legislação destinada à GRE. Tal legislação, além de trazer benefícios ambientais, também indiretamente beneficia sistemas de reciclagem de REs eficientes que ofereçam benefícios financeiros e logísticos.

Todavia, conforme Wu (2023) destaca, o processo de reciclagem de REs é mais complexo em comparação a resíduos sólidos homogêneos. Essa complexidade envolvida na reciclagem implica um maior uso de mão de obra humana, principalmente nas etapas de separação e de desmontagem ilustradas na Figura 4.

Figura 4 – Fluxo da reciclagem de resíduos eletroeletrônicos em um fluxo econômico linear.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

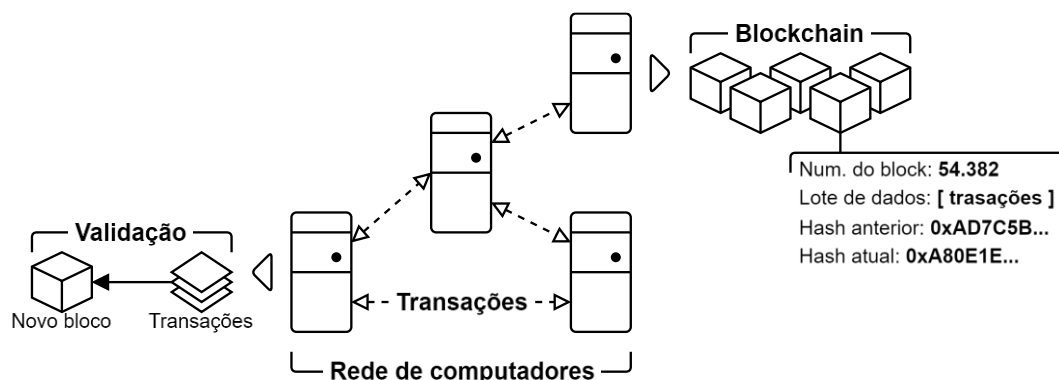
2.4 Tecnologia *blockchain*

A tecnologia *blockchain* origina-se da proposta de Nakamoto (2008) da criação da criptomoeda *Bitcoin*, concebida como uma maneira inovadora de criar um sistema de pagamento descentralizado e sem intermediação de instituições financeiras.

Essa tecnologia pode ser descrita como um livro-razão distribuído, que possibilita a criação de sistemas para registro de transações imutáveis de maneira sequencial (DWIVEDI *et al.*, 2021; ELLINGER *et al.*, 2023; MOUGAYAR, 2017). O termo “*blockchain*” deriva da estrutura de dados utilizada no armazenamento persistente (PACHECO, 2019).

Como descrito por Faqir-Rhazoui *et al.* (2021) e ilustrado na Figura 5, uma rede *blockchain* pode ser concebida como um banco de dados distribuído e compartilhado por unidades computacionais interconectadas, operando de forma autônoma, sem a necessidade de um administrador central, e adotando um algoritmo de consenso para garantir a integridade dos dados.

Figura 5 – Representação de uma rede *blockchain* na qual computadores realizam o processo de validação das transações compartilhadas e armazenam o histórico de transações em lotes sequenciais denominados blocos.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Redes *blockchain* podem ser públicas, como as redes *Bitcoin* e *Ethereum*, ou privadas, utilizadas internamente em organizações (ROUHANI; POURHEIDARI; DETERS, 2018). Essas redes oferecem mecanismo confiável para gestão descentralizada, troca de informações, tokenização de ativos e automação de processos (FILIPPI, 2017; KUTSYK; REDCHENKO; VORONKO, 2020).

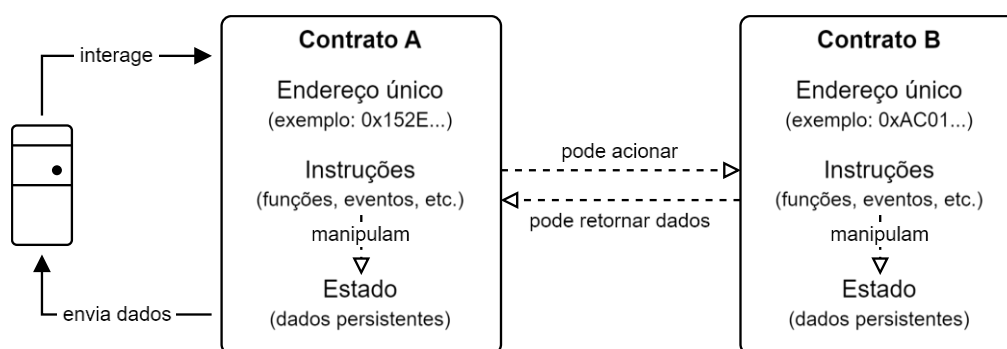
As transações realizadas dentro de uma rede *blockchain* são compartilhadas pelas unidades computacionais interconectadas e são agrupadas em um lote que recebe o nome de “bloco.” Para gerar um bloco, uma ou mais unidades computacionais realizam o processo denominado “validação.” Como comentado por Bonilla (2023, p. 86), esse processo, além de garantir a segurança da rede, incentiva a participação no processamento de dados.

Conforme Andoni *et al.* (2019), redes *blockchain* viabilizam a criação de sistemas de informação distribuídos, mais confiáveis e resilientes a ataques ou a perdas. Starkie (2017) e Blemus (2018) exemplificam a aplicação de *blockchain* em órgãos públicos dos Estados Unidos e na ONU, com projetos que visam a otimizar processos e a promover maior transparência de informações.

2.5 Contratos inteligentes

A concepção inicial de contratos inteligentes (SCs) foi feita por Szabo (1994), como uma solução para automatizar processos condicionados a eventos predeterminados. Conforme definido por Liu *et al.* (2020) e ilustrado na Figura 6, um SC é um programa computacional publicado em uma rede *blockchain* para automação de tarefas e armazenamento de dados de forma distribuída.

Figura 6 – Composição de contratos inteligentes e a representação de interações entre participantes da rede e outros contratos.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Descrito por Kutsyk *et al.* (2020) e Faqir-Rhazoui *et al.* (2021), os SCs são componentes fundamentais em redes *blockchain* modernas e servem como base para a computação descentralizada. São ainda uma solução técnica eficaz para formalizar processos entre *stakeholders*.

Como apresentado em Augustin *et al.* (2023), ao possibilitar a automação de processos e a gestão de ativos digitais de forma descentralizada e transparente, os SCs oferecem um mecanismo confiável para a execução de acordos, alinhados com o conceito de “constituição por código.”

A implementação de SCs depende das especificações do protocolo da rede *blockchain* em que serão publicados. No caso do protocolo *Ethereum*, a linguagem de programação *Solidity* é a mais utilizada e a comunicação entre usuários e contratos é realizada por meio de uma interface de funções definidas (ANAND; CHAUHAN, 2020).

Cada SC, publicando numa rede *blockchain*, é identificado por um endereço hexadecimal único e possui uma estrutura interna imutável, composta por dados persistentes, por funções para manipulação de dados, por eventos a serem emitidos à rede e a modificadores para controle de acesso (BONILLA, 2023, p. 93).

2.6 Organizações autônomas descentralizadas

Segundo Augustin *et al.* (2023), o modelo de Organizações Autônomas Descentralizadas (DAOs) começou a ser desenvolvido na década de 1990 no contexto da pesquisa sobre sistemas multiagentes.

Daniel Larimer cunhou o termo Corporação Autônoma Descentralizada (DACs), propondo uma estrutura organizacional regida por regras de negócio codificadas e gerenciadas de forma automatizada.

Inicialmente, o modelo de DAOs referia-se à DACs sem fins lucrativos. Porém, atualmente, o acrônimo DAC caiu em desuso e DAO tornou-se acrônimo padrão para referir-se a organizações que adotam esse modelo (ANAND; CHAUHAN, 2020).

Uma DAO é uma organização cuja governança e operação são implementadas em regras e processos codificados em SCs publicados numa rede *blockchain*. Essa característica confere às DAOs a capacidade de operar de forma distribuída e sem a necessidade de entidades centralizadoras na gestão de suas operações (ANAND; CHAUHAN, 2020; BELLAVITIS; FISCH; MOMTAZ, 2023; LIN *et al.*, 2023; WANG *et al.*, 2019b).

Conforme descrito por Augustin *et al.* (2023), a governança, a tomada de decisões e a manutenção de DAOs são realizadas pela comunidade que as mantém e por meio de mecanismos participativos, como fóruns e votações. A tecnologia *blockchain* garante a transparência, o consenso e a coordenação das ações e a confiabilidade das decisões dos *stakeholders*.

As DAOs apresentam um potencial significativo para mitigar riscos associados a monopólios e oferecem maior transparência e confiança em operações automatizadas (BONILLA, 2023, p. 96). No âmbito financeiro, DAOs também podem contribuir para a redução de custos e oferecer maior controle e acesso a investidores (ANAND; CHAUHAN, 2020; BELLAVITIS; FISCH; MOMTAZ, 2023).

O modelo de governança de DAOs pode ser analisado sob diferentes perspectivas teóricas. Conforme resumido por Santana e Albareda (2022) e Alawadi *et al.* (2024), algumas das teorias são a Teoria da Agência, a Teoria da Sociomaterialidade e a Teoria da Administração.

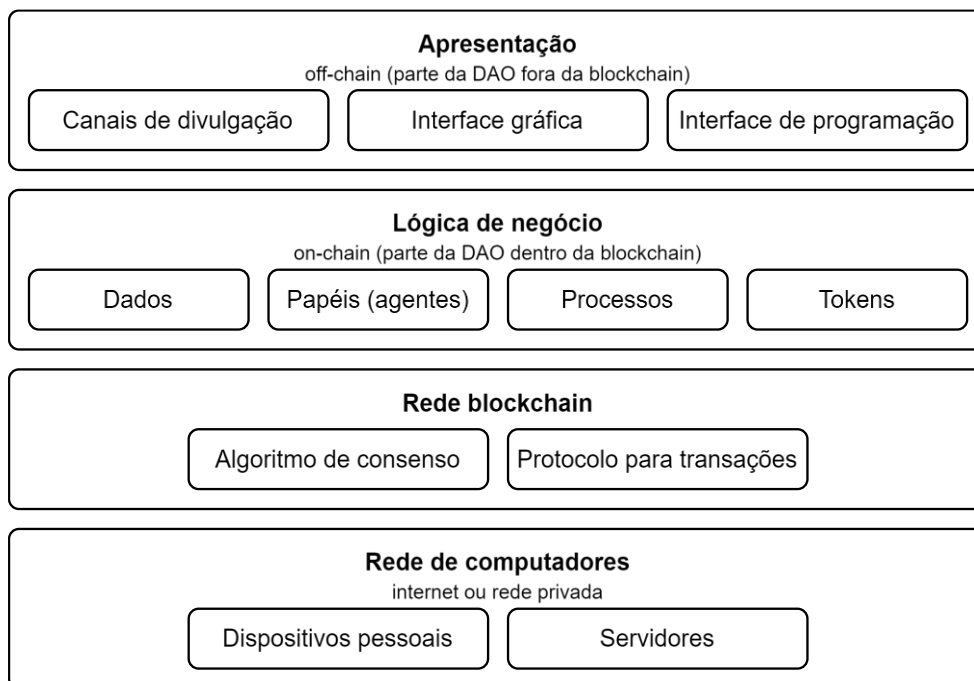
Sob a ótica da Teoria da Agência (*Agency Theory*), descrita por Jensen e Meckling (1976), uma DAO pode ser vista como um conjunto de contratos entre stakeholders com objetivos e preferências distintos que devem cooperar para maximizar o lucro da organização.

Sob a ótica da Teoria da Sociomaterialidade (*Sociomateriality Theory*), descrita por Huber (1990), uma DAO é um exemplo de organização com dependência plena entre pessoas e tecnologia. Essa teoria oferece base para compreender como a tecnologia, o trabalho e as pessoas estão social e materialmente interligados.

Sob a ótica da Teoria da Administração (*Stewardship Theory*), descrita por Davis *et al.* (1997), uma DAO deve buscar condições que criem interesses equilibrados entre *stakeholders*, os quais devem agir no melhor interesse da organização, colaborando para seu crescimento conjunto.

No contexto da estrutura desse modelo organizacional, a literatura acadêmica apresenta uma diversidade de arquiteturas. Os trabalhos de Scholz e Stein (2018), Wang *et al.* (2019b), Wang *et al.* (2019c) e Chawla (2020) são exemplos relevantes nesse sentido. A Figura 7 sintetiza e detalha os componentes comuns a essas propostas, oferecendo uma visão abrangente da arquitetura típica de uma DAO.

Figura 7 – Modelo conceitual da arquitetura de uma DAO.



Fonte: Baseado em Scholz e Stein (2018), Wang *et al.* (2019b), Wang *et al.* (2019c) e Chawla (2020).

CAPÍTULO III

3 MÉTODOS DE PESQUISA

3.1 Métodos aplicados no Artigo I

Disponível na íntegra no APÊNDICE A, o artigo emprega uma abordagem metodológica composta por dois métodos complementares: uma revisão sistemática da literatura e uma análise documental de práticas de governança em DAOs em atividade. Os métodos são guiados a partir de questões de pesquisa relevantes para o objetivo do artigo: a elaboração de um *framework* conceitual sobre a governança em DAOs.

A busca por publicações acadêmicas foi realizada nas bases *Scopus* e *Web of Science*, considerando critérios, como tipo de publicação, idioma, ano de publicação e presença de palavras-chave relacionadas a DAOs/DACs e comunidade/governança. O processo de revisão também inclui uma técnica de *snowballing* para capturar referências relevantes encontradas nas publicações selecionadas.

A análise documental das práticas de governança foca em cinco DAOs: *Arbitrum*, *GnosisDAO*, *MantleDAO*, *Optimism* e *Uniswap*. Essas DAOs foram selecionadas com base em suas reservas substanciais de capital; são as DAOs com maior capital acumulado no ano de 2024 segundo o relatório da *DeepDAO* (2024). A coleta de informações documentais envolve o exame de fontes publicamente disponíveis no próprio relatório da *DeepDAO* e nos sites oficiais das organizações.

Resumidamente, esses dois métodos complementares permitem uma visão mais integral entre a compreensão teórica e as implementações prática de governança em DAOs. A revisão sistemática da literatura fornece a base teórica necessária e identifica conceitos-chave, enquanto a análise documental oferece evidências de como DAOs existentes implementam modelos de governança descentralizada.

3.2 Métodos aplicados no Artigo II

Disponível na íntegra no APÊNDICE B, o artigo emprega dois métodos para analisar os fatores estratégicos da aplicação da tecnologia *blockchain* na gestão de REs no Brasil.

O primeiro método é uma análise estruturada que considera três domínios interligados: os requisitos do Decreto nº 10.240 sobre logística reversa de REs, os fatores limitantes prevalentes no cenário brasileiro de gestão de REs e as capacidades técnicas de *blockchain*. Essa análise visa a identificar potenciais sobreposições e sinergias em que as capacidades da

tecnologia podem viabilizar soluções às limitações existentes e facilitar o cumprimento do quadro legal.

O segundo método é uma análise SWOT de aplicação da tecnologia *blockchain* na gestão de REs. A lógica de classificação para cada dimensão foram os pontos fortes, como capacidades de geração de valor da tecnologia *blockchain*; as fraquezas, como limitações atuais das ferramentas e técnicas da tecnologia; as oportunidades, como potencial de cocriação de valor pela possibilidade de soluções na gestão de REs, usando da tecnologia e das ameaças, como riscos da adoção da tecnologia no contexto dessa gestão.

A análise SWOT fornece uma maneira estruturada de avaliar estrategicamente os pontos fortes e fracos internos da tecnologia *blockchain*, juntamente com as oportunidades e ameaças externas, para a gestão de REs no Brasil, permitindo uma compreensão simples e organizada dos fatores que influenciam a adoção da tecnologia nesse contexto.

Resumidamente, os dois métodos oferecem uma abordagem estruturada para conectar os desafios empíricos e o cenário regulatório da gestão de REs no Brasil com o potencial de *blockchain*; fornecem um mapeamento para soluções, requisitos e avaliação estratégica dos fatores internos e externos que influenciam a adoção da tecnologia neste domínio.

3.3 Métodos aplicados no Artigo III

Disponível na íntegra no APÊNCIDE C, o artigo emprega o desenvolvimento de uma prova de conceito e um caso de negócio experimental para avaliar a viabilidade de uma DAO no controle da geração de REs e a reinserção de matérias-primas na cadeia produtiva pela reciclagem.

Por meio da prova de conceito, é avaliado como uma DAO implementada sob uma rede *Ethereum* pode suportar requisitos funcionais em modelos de negócios circulares, como rastreabilidade, automação de processos, definição de funções, regras negociais. Apontam-se também limitações técnicas encontradas.

A prova de conceito implementa uma DAO; hospeda-a em uma rede *blockchain Ethereum* privada e codifica-a em seis contratos inteligentes, cinco que codificam a lógica de negócios estabelecida e um que automatiza o caso de negócio experimental da DAO.

O caso experimental de negócios fornece um cenário hipotético com *stakeholders* fictícios pré-estabelecidos, com fluxo de processo e com regras de negócios para rastreio, descarte, reciclagem de REs e recuperação de matérias-primas para reinserção na cadeia produtiva.

CAPÍTULO IV

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Resultados e discussões do Artigo I

Disponível na íntegra no APÊNDICE A, o artigo desenvolve um *framework* conceitual para a governança da DAO composta em cinco dimensões: descentralização sustentável, responsabilidade na decisão, risco de centralização, limitação de votação e engajamento da comunidade. Cada dimensão é elaborada com conceitos, métricas e estratégias de implementação e controle.

Em relação à dimensão de descentralização sustentável, identificam-se sete perspectivas teóricas com que o modelo de governança em DAOs pode ser analisado. Essa variedade de escopos ocorre pela complexidade intrínseca em uma organização com governança descentralizada na qual, apesar do ideal democrático das DAOs, *stakeholders* podem operar contra ou a favor de interesses comuns de maneira não determinística.

Em relação à dimensão de responsabilidade na decisão, destacam-se quatro atores-chave na governança de DAOs. São eles fundadores, investidores, desenvolvedores e mineradores/validadores. Conforme estudos revisados, existem uma forte influência por parte de fundadores e desenvolvedores devido ao fato de que esse papel oferece capacidades diretas em encaminhar a organização.

Em relação à dimensão de riscos de centralização, apesar da ideia de descentralidade no conceito de DAOs, essas organizações geralmente exibem elementos de centralização de decisões em sua estrutura, com influência considerável detida por grandes detentores de *tokens* e *stakeholders* envolvidos nos estágios iniciais do desenvolvimento da organização, o que pode gerar desequilíbrios de poder e conflitos de interesses.

Em relação à dimensão de limitação de votação, identificam-se fatores, como poder desproporcional de *stakeholders* detidos de grandes quantias de *tokens*, potencial de manipulação de votos, desafios relacionados ao anonimato, à participação desinformada e a ineficiências na tomada de decisões operacionais. Alguns estudos revisados propõem soluções técnicas para incentivar a participação no longo prazo e a prática da delegação de votos.

Em relação à dimensão de engajamento da comunidade, discutem-se os desafios de garantir o envolvimento ativo da comunidade devido ao desinteresse, ao potencial anonimato e aos *stakeholders* mal-intencionados. Fontes revisadas indicam algumas estratégias para aumentar o engajamento, dentre elas: mecanismos robustos de incentivo, contratos de aquisição

vinculados ao valor do *token*, votação gamificada, propostas simplificadas, maior comunicação e consideração da experiência organizacional.

4.2 Resultados e discussões do Artigo II

Disponível na íntegra no APÊNDICE B, o artigo aponta que a tecnologia *blockchain* possui um potencial significativo para aprimorar sistemas de gestão de REs no contexto brasileiro, destacando capacidades relevantes de *blockchain*, como maior transparência, maior segurança, maior rastreabilidade e maior redução de custos por automação.

A primeira análise, relativa aos fatores limitantes, à legislação (Decreto nº 10.240) e à tecnologia *blockchain*, demonstra que *blockchain* pode ser usada para implementar ou automatizar determinados requisitos legais, para facilitar uma melhor quantificação das matérias-primas recuperadas e para permitir uma maior disponibilidade de dados confiáveis sobre coleta e sobre reciclagem de REs no Brasil.

Além disso, sistemas baseados em *blockchain* podem ser a base para programas de incentivo que utilizem *tokens* e ações de controle, além de fomentar uma padronização e uma maior transparência de processos, promovendo a colaboração e incentivando o cumprimento da legislação.

A segunda análise, no modelo SWOT, descreve os pontos fortes da tecnologia *blockchain* na habilitação de redes de agentes e interações comerciais, promovendo o consenso sem entidades centralizadas, a inovação e a eficiência, além das oportunidades na cocriação de valor entre entidades envolvidas na cadeia produtiva de eletrônicos.

A relevância desses resultados decorre do fato de que o Brasil enfrenta desafios significativos na gestão de REs. A falta de dados confiáveis, o controle governamental ineficaz, a presença de um grande mercado informal e a escassez de programas de gestão de REs são desafios para os quais a tecnologia *blockchain* pode ser a base de soluções concretas.

4.3 Resultados e discussões do Artigo III

Disponível na íntegra no APÊNDICE C, o artigo fornece uma avaliação da viabilidade do modelo organizacional de DAO no controle da geração de REs e ainda a reinserção de matérias-primas na cadeia produtiva pela reciclagem.

Os resultados da prova de conceito, junto ao caso experimental de negócios, demonstram a viabilidade tecnológica do uso de contratos inteligentes para codificar regras de

negócios, para gerenciar identidades, para rastrear dados de produtos e materiais e implementar mecanismos de crédito em um cenário simulado de reciclagem de REs.

No entanto, também se identificou um desafio significativo associado aos custos de transação no caso de hospedagem da DAO na rede *Ethereum* pública, o que pode tornar economicamente inviáveis iniciativas de reciclagem em pequena escala.

Além disso, a imutabilidade de contratos inteligentes, estabelecida pela arquitetura de uma rede *Ethereum*, demonstra-se como uma limitação técnica passível de impactos negativos e limitadores em atualizações de lógicas de negócio e correções de erros.

Essas limitações apontam que a tecnologia *blockchain*, embora com seu potencial teórico, ainda não possui implementações técnicas plenamente viáveis. Outras opções de redes *blockchain*, como *Hyperledger Fabric* ou *Solana*, também possuem limitações técnicas e complexidades de utilização, o que dificulta o desenvolvimento de soluções acessíveis.

Contudo, os resultados oferecem uma avaliação promissora sobre a aplicação de DAOs no contexto da reciclagem de lixo eletrônico; demonstram potenciais em atender requisitos funcionais da economia circular; porém, também se ressaltam limitações econômicas e técnicas que apontam para futuras pesquisas.

CAPÍTULO V

5 CONCLUSÕES

5.1 Reflexões e integrações dos resultados

Retomando a SEÇÃO 1.2, o objetivo central da dissertação é avaliar a aplicabilidade do modelo de DAO no desenvolvimento de soluções técnicas inovadoras na reciclagem de REs. A avaliação foi dividida em três dimensões, cada uma explorada por um dos três artigos que compõem essa dissertação. Essa seção apresenta uma visão integrada dos resultados das três dimensões dessa avaliação.

O Artigo I (APÊNDICE A) relaciona-se à dimensão de Governança Organizacional, desenvolvendo um *framework* conceitual para a governança de DAOs e contribuindo para o conhecimento sobre governança comunitária e descentralizada e fornecendo uma ferramenta conceitual de apoio à compreensão da dinâmica organizacional, o que é crucial para a implementação de uma DAO.

O Artigo II (APÊNDICE B) relaciona-se à dimensão de Problemas Empíricos e Regulatórios, abordando essas limitações na gestão de REs e explorando a aplicação estratégica da tecnologia *blockchain* nesse contexto, em paralelo a uma análise SWOT que destacou pontos fortes da tecnologia em permitir redes, interações e eficiência. Esse artigo demonstra o potencial de *blockchain* como tecnologia base para enfrentar os desafios na gestão de REs.

O Artigo III (APÊNDICE C) relaciona-se à dimensão de Viabilidade Técnica, avaliando uma DAO implementada com ferramentas de *blockchain* disponíveis. A prova de conceito e o caso experimental de negócios demonstraram a viabilidade técnica do uso de contratos inteligentes para regras de negócios, de gerenciamento de identidade, de rastreamento de resíduos e de mecanismos de crédito. Este artigo fornece evidências empíricas das possibilidades e das limitações técnicas da implementação de uma DAO para reciclagem de REs.

Integrando esses achados, a avaliação imposta pelo objeto geral dessa dissertação tem como resultado promissor da aplicação de DAOs soluções técnicas inovadoras na reciclagem de REs. Todavia, a implementação bem-sucedida de uma DAO nesse contexto ainda possui barreiras consideráveis, como questões legais, limitações técnicas de soluções de *blockchain* disponíveis, custos elevados de processamento e acesso à tecnologia a um público comum.

5.2 Continuidade da pesquisa

Com base no contexto, nos objetivos e nos resultados dessa dissertação, surgem vários caminhos para futuras pesquisas, tanto com foco na reciclagem de REs, como em outras etapas de uma economia circular de produtos.

Em relação à governança organizacional, pesquisas futuras podem explorar cada uma das cinco dimensões do *framework* proposto no Artigo I (APÊNDICE A), desenvolvendo meios de mensurar e monitorar métricas de eficácia da governança e investigando o papel de diferentes mecanismos de incentivo além de *tokenização*.

Em relação aos problemas empíricos e à legislação sobre gestão de REs, pesquisas futuras podem identificar oportunidades e barreiras globais para a implementação de soluções baseadas em *blockchain*, além de buscar o conhecimento de especialista envolvido no setor informal de REs, querendo entender sua influência.

Em relação à viabilidade técnica, pesquisas futuras podem desenvolver protótipos de DAO em plataformas *blockchain* alternativas, além da *Ethereum*, e desenvolver soluções de integração de outras tecnologias da Indústria 4.0, como a Internet das Coisas.

É considerável também investigar soluções para mitigar os desafios econômicos associados aos custos de transação em redes públicas de *blockchain*, além de explorar mecanismos para atualizar e modificar contratos inteligentes sem comprometer a confiabilidade e a integridade da informação.

Contudo, segundo os resultados desse trabalho junto às oportunidades observadas, é considerável pensar a aplicação de DAOs na gestão de REs como um riquíssimo campo para novas pesquisas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABUBAKAR, I. R. et al. Environmental Sustainability Impacts of Solid Waste Management Practices in the Global South. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 19, n. 19, p. 12717, 5 out. 2022.
- ALAROOD, A. A. et al. Electronic Waste Collection Incentivization Scheme Based on the Blockchain. **Sustainability**, v. 15, n. 13, p. 10209, 27 jun. 2023.
- ALAWADI, A. et al. Decentralized autonomous organizations (DAOs): Stewardship talks but agency walks. **Journal of Business Research**, v. 178, p. 114672, maio 2024.
- AMBRE, D.; TRIVEDI, P. **Design and Implementation of a Hyperledger Fabric-Based E-Waste Management System for Home and Small-Scale Businesses**. 2024 IEEE International Conference on Interdisciplinary Approaches in Technology and Management for Social Innovation (IATMSI). **Anais...** Em: 2024 IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON INTERDISCIPLINARY APPROACHES IN TECHNOLOGY AND MANAGEMENT FOR SOCIAL INNOVATION (IATMSI). Gwalior, India: IEEE, 14 mar. 2024. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/10503244/>>. Acesso em: 8 abr. 2025
- ANAND, P.; CHAUHAN, A. The advent of ownerless businesses: Decentralised autonomous organisations. **International Journal of Scientific and Technology Research**, v. 9, n. 2, p. 2848–2852, fev. 2020.
- ANDONI, M. et al. Blockchain technology in the energy sector: A systematic review of challenges and opportunities. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 100, p. 143–174, fev. 2019.
- ARUMUGAM, L. S. S. D. et al. **Effective Tracing and Tracking of E-Waste using Blockchain Technology**. 2024 3rd International Conference on Applied Artificial Intelligence and Computing (ICAAIC). **Anais...** Em: 2024 3RD INTERNATIONAL CONFERENCE ON APPLIED ARTIFICIAL INTELLIGENCE AND COMPUTING (ICAAIC). Salem, India: IEEE, 5 jun. 2024. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/10575701/>>. Acesso em: 8 abr. 2025
- AUGUSTIN, N.; ECKHARDT, A.; DE JONG, A. W. Understanding decentralized autonomous organizations from the inside. **Electronic Markets**, v. 33, n. 1, p. 38, dez. 2023.

BALDÉ, K. et al. **The Global E-waste Monitor 2017**. [s.l.] International Telecommunication Union, 2017. Disponível em: <https://collections.unu.edu/eserv/UNU:6341/Global-E-waste_Monitor_2017__electronic_single_pages_.pdf>. Acesso em: 12 out. 2024.

BARALLA, G. et al. Waste management: A comprehensive state of the art about the rise of blockchain technology. **Computers in Industry**, v. 145, p. 103812, fev. 2023.

BELKHIR, L.; ELMELIGI, A. Assessing ICT global emissions footprint: Trends to 2040 & recommendations. **Journal of Cleaner Production**, v. 177, p. 448–463, mar. 2018.

BELLAVITIS, C.; FISCH, C.; MOMTAZ, P. P. The rise of decentralized autonomous organizations (DAOs): a first empirical glimpse. **Venture Capital**, v. 25, n. 2, p. 187–203, 3 abr. 2023.

BLEMUS, S. Law and Blockchain: A Legal Perspective on Current Regulatory Trends Worldwide. **SSRN Electronic Journal**, 2018.

BONILLA, S. H. **Transformação digital e Indústria 4.0: Produção e sociedade**. São Paulo, SP, Brasil: Editora Edgard Blucher, 2023.

CHAWLA, C. Trust in blockchains: Algorithmic and organizational. **Journal of Business Venturing Insights**, v. 14, p. e00203, nov. 2020.

DASAKLIS, T. K.; CASINO, F.; PATSAKIS, C. **A traceability and auditing framework for electronic equipment reverse logistics based on blockchain: the case of mobile phones**. 2020 11th International Conference on Information, Intelligence, Systems and Applications (IISA). **Anais...** Em: 2020 11TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON INFORMATION, INTELLIGENCE, SYSTEMS AND APPLICATIONS (IISA). Piraeus, Greece: IEEE, 15 jul. 2020. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/9284394/>>. Acesso em: 23 nov. 2023

DAVIS, J. H.; SCHOORMAN, F. D.; DONALDSON, L. Toward a Stewardship Theory of Management. **The Academy of Management Review**, v. 22, n. 1, p. 20, jan. 1997.

DEEPDAO. **DeepDAO**. Disponível em: <<https://deepdao.io/organizations>>. Acesso em: 18 ago. 2024.

DWIVEDI, V. et al. A Formal Specification Smart-Contract Language for Legally Binding Decentralized Autonomous Organizations. **IEEE Access**, v. 9, p. 76069–76082, 2021.

ELLINGER, E. W. et al. Decentralized Autonomous Organization (DAO): The case of MakerDAO. **Journal of Information Technology Teaching Cases**, 13 jun. 2023.

EMF. **The circular economy in detail**. Disponível em:

<<https://www.ellenmacarthurfoundation.org/the-circular-economy-in-detail-deep-dive>>.

Acesso em: 12 out. 2024.

FAQIR-RHAZOU, Y.; ARROYO, J.; HASSAN, S. A comparative analysis of the platforms for decentralized autonomous organizations in the Ethereum blockchain. **Journal of Internet Services and Applications**, v. 12, n. 1, p. 9, dez. 2021.

FARIZI, T. S.; SARI, R. F. **Implementation of Blockchain-based Electronic Waste Management System with Hyperledger Fabric**. 2021 2nd International Conference on ICT for Rural Development (IC-ICTRuDev). **Anais...** Em: 2021 2ND INTERNATIONAL CONFERENCE ON ICT FOR RURAL DEVELOPMENT (IC-ICTRUDEV). Jogjakarta, Indonesia: IEEE, 27 out. 2021. Disponível em:

<<https://ieeexplore.ieee.org/document/9656503/>>. Acesso em: 8 abr. 2025

FILIPPI, P. D. What Blockchain Means for the Sharing Economy. **Harvard Business Review**, 15 mar. 2017.

GEISSDOERFER, M. et al. Circular business models: A review. **Journal of Cleaner Production**, v. 277, p. 123741, dez. 2020.

GUPTA, N.; BEDI, P. **E-waste Management Using Blockchain based Smart Contracts**. 2018 International Conference on Advances in Computing, Communications and Informatics (ICACCI). **Anais...** Em: 2018 INTERNATIONAL CONFERENCE ON ADVANCES IN COMPUTING, COMMUNICATIONS AND INFORMATICS (ICACCI). Bangalore: IEEE, set. 2018. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/8554912/>>. Acesso em: 8 abr. 2025

HASSAN, S.; DE FILIPPI, P. Decentralized Autonomous Organization. **Internet Policy Review**, v. 10, n. 2, 20 abr. 2021.

HUBER, G. P. A Theory of the Effects of Advanced Information Technologies on Organizational Design, Intelligence, and Decision Making. **The Academy of Management Review**, v. 15, n. 1, p. 47, jan. 1990.

IEEE. **How Blockchain Can Solve the Growing E-Waste Problem**. **IEEE Innovate**, 27 maio 2021. Disponível em: <<https://innovate.ieee.org/innovation-spotlight/how-blockchain-can-solve-the-growing-e-waste-problem/>>. Acesso em: 7 abr. 2025

JENSEN, M. C.; MECKLING, W. H. Theory of the firm: Managerial behavior, agency costs and ownership structure. **Journal of Financial Economics**, v. 3, n. 4, p. 305–360, out. 1976.

KHAN, A. U. R.; AHMAD, R. W. A Blockchain-Based IoT-Enabled E-Waste Tracking and Tracing System for Smart Cities. **IEEE Access**, v. 10, p. 86256–86269, 2022.

KIRCHHERR, J.; REIKE, D.; HEKKERT, M. Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 127, p. 221–232, dez. 2017.

KORHONEN, J.; HONKASALO, A.; SEPPÄLÄ, J. Circular Economy: The Concept and its Limitations. **Ecological Economics**, v. 143, p. 37–46, jan. 2018.

KRISTOFFERSEN, E. et al. The smart circular economy: A digital-enabled circular strategies framework for manufacturing companies. **Journal of Business Research**, v. 120, p. 241–261, nov. 2020.

KUTSCHKE, A.; RESE, A.; BAIER, D. The Effects of Locational Factors on the Performance of Innovation Networks in the German Energy Sector. **Sustainability**, v. 8, n. 12, p. 1281, 8 dez. 2016.

KUTSYK, P.; REDCHENKO, K.; VORONKO, R. Management Control and Modern Decentralized Technologies. **Baltic Journal of Economic Studies**, v. 6, n. 4, p. 98–102, 24 nov. 2020.

LIN, Y. et al. City 5.0: Towards Spatial Symbiotic Intelligence via DAOs and Parallel Systems. **IEEE Transactions on Intelligent Vehicles**, v. 8, n. 7, p. 3767–3770, jul. 2023.

LIU, X. L. et al. Industrial blockchain based framework for product lifecycle management in industry 4.0. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**, v. 63, p. 101897, jun. 2020.

MIHAI, F.-C.; GNONI, M.-G. E-waste Management as a Global Challenge (Introductory Chapter). Em: MIHAI, F.-C. (Ed.). **E-Waste in Transition - From Pollution to Resource**. [s.l.] InTech, 2016.

MINTER, A. **How We Think about E-Waste Is in Need of Repair**. Disponível em: <<http://www.anthropocenemagazine.org/ewaste-repair>>. Acesso em: 9 out. 2024.

MOUGAYAR, W. **Blockchain para os negócios: promessa, prática e aplicação da nova tecnologia da internet**. 1st. ed. Rio de Janeiro, RJ, Brasil: Alta Books, 2017.

NAKAMOTO, S. Bitcoin: A Peer-to-Peer Electronic Cash System. 2008.

PACHECO, M. N. J. De la tecnología blockchain a la economía del token. **Derecho PUCP**, n. 83, p. 61–87, 2019.

PING, G. et al. Blockchain Based Reverse Logistics Data Tracking: An Innovative Approach to Enhance E - Waste Recycling Efficiency. **World Journal of Innovation and Modern Technology**, v. 7, n. 4, p. 11–31, 26 jul. 2024.

ROUHANI, S.; POURHEIDARI, V.; DETERS, R. **Physical Access Control Management System Based on Permissioned Blockchain**. 2018 IEEE International Conference on Internet of Things (iThings) and IEEE Green Computing and Communications (GreenCom) and IEEE Cyber, Physical and Social Computing (CPSCom) and IEEE Smart Data (SmartData). **Anais...** Em: 2018 IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON INTERNET OF THINGS (ITHINGS) AND IEEE GREEN COMPUTING AND COMMUNICATIONS (GREENCOM) AND IEEE CYBER, PHYSICAL AND SOCIAL COMPUTING (CPSCOM) AND IEEE SMART DATA (SMARTDATA). Halifax, NS, Canada: IEEE, jul. 2018. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/8726490/>>. Acesso em: 7 fev. 2024

SAHOO, S.; HALDER, R. Blockchain-Based Forward and Reverse Supply Chains for E-waste Management. Em: DANG, T. K. et al. (Eds.). **Future Data and Security Engineering**. Cham: Springer International Publishing, 2020. v. 12466p. 201–220.

SANTANA, C.; ALBAREDA, L. Blockchain and the emergence of Decentralized Autonomous Organizations (DAOs): An integrative model and research agenda. **Technological Forecasting and Social Change**, v. 182, p. 121806, set. 2022.

SCHOLZ, T. M.; STEIN, V. **The Architecture of Blockchain Organization**. Thirty Ninth International Conference on Information Systems. **Anais...** Em: THIRTY NINTH INTERNATIONAL CONFERENCE ON INFORMATION SYSTEMS. San Francisco, USA: 2018. Disponível em:
<https://web.archive.org/web/20220803145204id_/https://aisel.aisnet.org/cgi/viewcontent.cgi?article=1245&context=icis2018>. Acesso em: 17 fev. 2024

SHYAMALATHA, G.; MUTHULAKSHMI, R.; RITHICK, S. Blockchain E-Waste Management. **International Journal of Scientific Development and Research**, v. 5, n. 4, p. 1–3, abr. 2020.

STARKIE, H. **Usage of Blockchain in the UN System**. . Em: TECHNOVATION DAY: BLOCKCHAIN. , ago. 2017. Disponível em:
<https://unite.un.org/sites/unite.un.org/files/session_3_b_blockchain_un_initiatives_final.pdf>. Acesso em: 8 fev. 2024

SZABO, N. **Smart Contracts**. , 1994. Disponível em:
<<https://www.fon.hum.uva.nl/rob/Courses/InformationInSpeech/CDROM/Literature/LOTwin terschool2006/szabo.best.vwh.net/smart.contracts.html>>. Acesso em: 6 out. 2023

URBAN, R. C.; NAKADA, L. Y. K. COVID-19 pandemic: Solid waste and environmental impacts in Brazil. **Science of The Total Environment**, v. 755, p. 142471, fev. 2021.

WANG, G. et al. Blockchain-Based Crypto Management for Reliable Real-Time Decision-Making. **IEEE Transactions on Computational Social Systems**, p. 1–10, 2022.

WANG, S. et al. Decentralized Autonomous Organizations: Concept, Model, and Applications. **IEEE Transactions on Computational Social Systems**, v. 6, n. 5, p. 870–878, out. 2019a.

WANG, S. et al. Decentralized Autonomous Organizations: Concept, Model, and Applications. **IEEE Transactions on Computational Social Systems**, v. 6, n. 5, p. 870–878, out. 2019b.

WANG, S. et al. Blockchain-Enabled Smart Contracts: Architecture, Applications, and Future Trends. **IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems**, v. 49, n. 11, p. 2266–2277, nov. 2019c.

WEF, W. E. F. **A New Circular Vision for Electronics - Time for a Global Reboot**. [s.l.] Platform for accelerating the circular economy, jan. 2019. Disponível em: <[http://www3.weforum.org/docs/WEF A New Circular Vision for Electronics.pdf](http://www3.weforum.org/docs/WEF_A_New_Circular_Vision_for_Electronics.pdf)>. Acesso em: 10 dez. 2023.

WU, T. L. **What Is E-Waste Recycling and How Is it Done?** Disponível em: <<https://earth.org/what-is-e-waste-recycling/>>. Acesso em: 12 out. 2024.

APÊNDICE A – ARTIGO I

Not just code: A framework for community governance and management in Decentralized Autonomous Organizations

Thomaz Henrique Viaro Bridi^{1*}, Berislav Andrić², Rodrigo Franco Gonçalves¹

¹Universidade Paulista, São Paulo, Brazil

²Faculty of Tourism and Rural Development, Požega, Croatia

*** Corresponding Author**

thomazh2000@gmail.com

Funding

This study was financed in part by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Finance Code 001.

Author contributions

Thomaz Henrique Viaro Bridi: Conceptualization, Data curation, Writing – original draft; Berislav Andrić: Funding acquisition; Rodrigo Franco Gonçalves: Supervision, Validation.

Not just code: A framework for community governance and management in Decentralized Autonomous Organizations

Abstract

The concept of Decentralized Autonomous Organizations (DAOs) has introduced a novel paradigm in organizational governance, characterized by more collaborative decision-making. However, the lack of established organizational frameworks for DAOs presents significant challenges to their constitution, stability, and longevity. Aiming to address this shortcoming, this paper presents a conceptual framework to guide the design of the community governance structure of DAOs. To achieve this aim, we employed two complementary methods: firstly, we conducted a systematic literature review about DAOs and community governance; secondly, we conducted an analysis of the governance methods employed by five DAOs operating in public blockchain ecosystems. The proposed framework provides a valuable tool for DAO founders, developers, and community members to design and implement effective governance structures and contributes to the understanding of DAO governance and further research.

Keywords: Blockchain, Digital business, Human-machine agency, Stakeholder engagement, Tokenized economy

1 Introduction

The emergence of computer networks has precipitated a paradigm shift in human organizations and interactions. A pivotal development within this trajectory was the dissemination of blockchain technology by Nakamoto (2008), presenting a foundation for novel economics and decentralized human interactions, bypassing intermediaries, and fostering new forms of human collaboration (L. Liu et al., 2021; Pacheco, 2019).

With its inherent attributes as a distributed ledger, blockchain presents applicability for diverse administrative functions. For example, logistics stands to gain traceability capabilities, while finance and tourism can enhance operational efficiencies and cost reduction. This capacity to support intelligent business operations across various domains ultimately enhances management and decision-making through verifiable and auditable data (Erceg et al., 2020; Pancić et al., 2023).

Decentralized Autonomous Organizations (DAOs) are a novel organizational model enabled by blockchain technology, operating as collaborative systems combining human and machine elements. DAOs are governed by rules and incentives encoded as smart contracts on a public blockchain, driving their operation through the voluntary efforts of their community members (Anand & Chauhan, 2020; E. Ellinger et al., 2024).

DAOs operate on principles of collective action where virtual community members collaborate to establish, debate, and vote on rules governing software protocols and oversee the exchange of shared assets (Santana & Albareda, 2022). This governance model enables participants to collectively

make decisions and manage organizational resources through consensus mechanisms and participative decision-making (Buterin, 2014; Wang et al., 2019).

Leveraging blockchain's transparency, immutability, and security, DAOs provide a platform for trust, collaboration, and innovation within a distributed network (Anand & Chauhan, 2020). According to DeepDAO's report (2024), DAOs are active across diverse fields, from finance to the arts, accumulating a total treasury of USD \$32.5 billion in assets collectively managed by 11.3 million token holders.

DAO scholarly literature has been focusing on blockchain and smart contract code-level to address technological features such as transparency through automated rule agreements defined in code without human intervention (Singh & Kim, 2019), smart contract automatic execution, encoded rules, and the decision-making process to create a structure with decentralized control (Wright, 2023). The present study intends to discuss DAO beyond the code level.

DAOs have a significant human component, which has prompted research into diverse areas, including conflict resolution (Chen & Cai, 2023), entrepreneurial endeavors (Oguntegbe et al., 2023; Poeschl, 2023), and participatory decision-making (Augustin et al., 2023).

As presented by Amend et al. (2023), Rausser et al. (2023), and Riaza and Gnabo (2023), DAOs are a more democratic model with an innovative functional structure compared to traditional organizations. This model can offer solutions to problems related to decentralized management and stakeholder's collaboration (W. Ding et al., 2023).

DAOs blend on-chain smart contracts with off-chain member interactions, empowering individuals to collaborate while simultaneously addressing the critical challenge of mitigating conflicts of interest and reducing misconduct. DAOs offer a novel approach to collective decision-making and operational oversight, fostering trust and transparency (Axelsen et al., 2022; Hsieh et al., 2018).

However, DAOs also present significant challenges, including technical complexity, public misunderstanding, regulatory hurdles, and practical operational issues (Gilson & Bouraga, 2024; Wang et al., 2019). As discussed by Ding et al. (2021), since there are no conventional organizational frameworks for DAOs to deal with their community governance, they must adopt and develop ways to organize themselves as they see fit.

To address this shortcoming, this paper presents a conceptual framework to guide the design of the community governance structure of DAOs. To achieve this aim, we employed two complementary methods: firstly, we conducted a systematic literature review about governance within DAOs; secondly, we conducted an analysis of the governance methods employed by five DAOs operating in public blockchain ecosystems.

Following this introduction, Section 2 outlines the methodological approach employed in this research. Section 3 presents a synthesis of existing literature. Section 4 presents an empirical analysis of governance mechanisms observed in the five selected DAOs. Section 5 presents the conceptual framework developed in this study, detailing its underlying logic and theoretical underpinnings. Section 6 concludes the article by acknowledging the study's limitations and further research.

2 Methodological approaches

This section details the methodological approach adopted for this research. Firstly, we outline the protocol followed for the systematic literature review, adhering to the established procedures of Kitchenham (2004). Secondly, we describe the analysis of governance practices within five DAOs operating in public blockchain ecosystems.

To guide the search for information, six research questions were formulated:

- RQ 1. What theoretical frameworks can guide community governance in DAOs?
- RQ 2. Who are the key stakeholders in DAO's community governance?
- RQ 3. How to increase engagement in DAO's community?
- RQ 4. What centralized elements exist in DAO's community governance?
- RQ 5. What are the voting limitations within DAO's governance?
- RQ 6. What are some common governance practices in successful DAOs?

The answers to the first five research questions inform the development of the proposed conceptual framework, while the findings from the sixth question (RQ6) supports it by providing descriptive evidence from real-world DAO governance examples.

2.1 Systematic literature review

We used Scopus and Web of Science as search platforms due to their comprehensive coverage, high quality, and reproducible results. The search was conducted in two strategies, using four search strings, two per strategy and platform.

The first search strategy was realized with the query strings presented in Table 1. These query strings seek to locate publications with the following characteristics and respective proposals:

- classified as articles, to ensure greater rigor and quality of information;
- written in English, given the linguistic ability of the authors and to facilitate source checking;
- published in 2023 or 2024, to find state-of-art research;
- containing in their title, abstract, or keywords the acronym terms of DAOs or DACs in singular or plural form and with American or British English grammar;
- with the terms "community" or "governance" in singular or plural forms.

During the reading step, references relevant to the topic were also included in the final selection, following a snowball practice.

Table 1. Query strings used in the first search strategy.

Source	Query
Scopus	<i>TITLE-ABS-KEY (("decentrali*ed autonomous corporation*" OR "decentrali*ed autonomous organi*ation*") AND ("governance*" OR "communit*")) AND (LIMIT-TO (DOCTYPE , "ar")) AND (LIMIT-TO (LANGUAGE , "English")) AND (LIMIT-TO (PUBYEAR , 2023) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2024))</i>
Web of Science	<i>(TI= (("decentrali*ed autonomous corporation*" OR "decentrali*ed autonomous organi*ation*") AND ("governance*" OR "communit*")) OR AB= (("decentrali*ed autonomous corporation*" OR "decentrali*ed autonomous organi*ation*") AND ("governance*" OR "communit*"))) OR AK=(("decentrali*ed autonomous corporation*" OR "decentrali*ed autonomous organi*ation*") AND ("governance*" OR "communit*"))) AND (PY== ("2023" OR "2024") AND DT== ("ARTICLE") AND LA== ("ENGLISH"))</i>

The second search strategy was realized with the query strings presented in Table 2, looking for publications from years before 2023, and not only articles. These query strings seek to locate publications with the following characteristics and respective proposals:

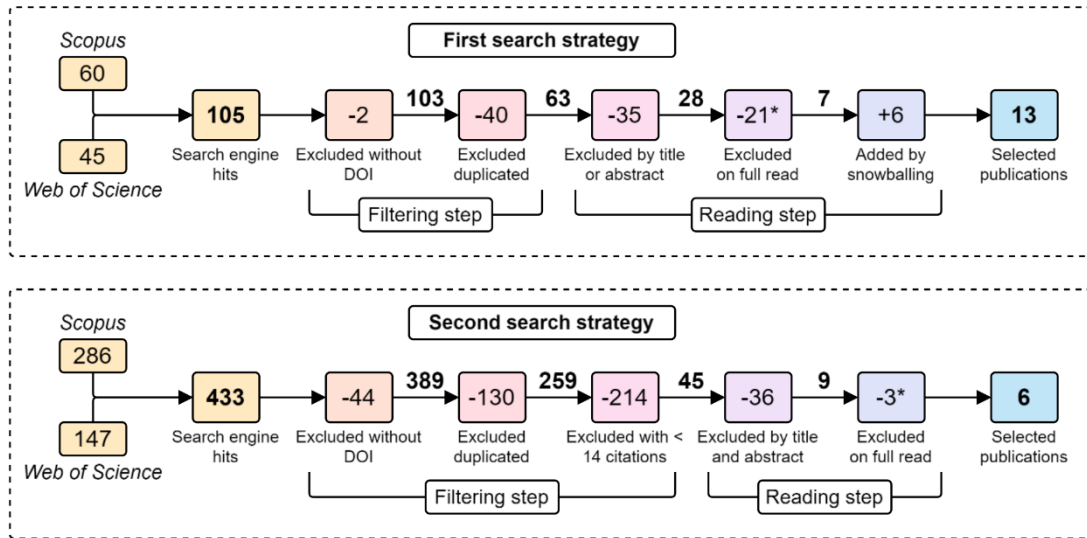
- written in English, given the linguistic ability of the authors and to facilitate source checking;
- containing in their title, abstract, or keywords the acronym terms of DAOs or DACs in singular or plural form and with American or British English grammar;
- with the terms "community" or "governance" in singular or plural forms.

As part of the filtering stage, publications were selected whose number of citations were equal to or greater than the sample average, in this case fourteen citations.

Table 2. Query strings used in the second search strategy.

Source	Query
Scopus	<i>TITLE-ABS-KEY (("decentrali*ed autonomous corporation*" OR "decentrali*ed autonomous organi*ation*") AND ("governance*" OR "communit*")) AND (LIMIT-TO (LANGUAGE , "English"))</i>
Web of Science	<i>(TI= (("decentrali*ed autonomous corporation*" OR "decentrali*ed autonomous organi*ation*") AND ("governance*" OR "communit*")) OR AB= (("decentrali*ed autonomous corporation*" OR "decentrali*ed autonomous organi*ation*") AND ("governance*" OR "communit*"))) OR AK=(("decentrali*ed autonomous corporation*" OR "decentrali*ed autonomous organi*ation*") AND ("governance*" OR "communit*"))) AND (LA== ("ENGLISH"))</i>

Figure 1. Sequential steps of each search strategies applied, indicating the number of articles excluded and retained at each step.



* Also excluding publications that incorporate information from others selected ones or which authors didn't have direct access.

Each search strategy has a sequence of selection steps, as shown in Figure 1. Considering the final selection of the two search strategies, we selected nineteen articles to answer the research questions of this systematic literature review. The raw data underlying this article will be accessible through the publisher's platform.

2.2 Analysis of governance practices in DAOs

To address RQ 6, we analyzed the governance practices of five prominent DAOs operating within public blockchain ecosystems: Arbitrum, GnosisDAO, MantleDAO, Optimism, and Uniswap. These DAOs were selected because they were among the top 10 with the highest treasury reserves, as reported by DeepDAO (2024), signifying their influence within their respective blockchain ecosystems.

We conducted this documentary analysis by collecting information from the official websites of the selected DAOs. The subsections of Section 4 reference these websites and present a summary of the findings.

To ensure comprehensive data collection, five key aspects of DAO governance were defined to guide the information search. These key aspects, listed in Table 3, served as a structured document analysis protocol for identifying relevant data points across the selected DAOs.

Table 3. Governance aspects observed in analyzed DAOs.

Governance aspect	Description
Governance structure	This dimension examines whether the DAO employs a hierarchical or distributed governance model.
Token-holder influence	The extent to which token holders directly or indirectly influence decision-making processes within the DAO.
Community participation	Methods for community members to engage in governance activities, such as discussions, proposals, and voting.
On-chain governance	The utilization of smart contracts and other on-chain mechanisms to execute and enforce governance decisions.

3 Findings in academic literature

This section presents our findings and discussion related to research questions RQ 1 to RQ 5.

3.1 Related Theories

The community governance of DAOs can be analyzed through several theories that evaluate different perspectives (RQ 1). As summarized by Santana and Albareda (2022), some of the applicable theories are:

- Agency Theory can offer ways to develop strategies to mitigate agents' self-interested behavior, which can cause governance conflicts in DAOs;
- Theory of Institutions for Collective Actions can offer ways to understand how DAOs, as peer-to-peer communities, manage shared digital assets;
- Sociomateriality Theory can offer ways to analyze the human-machine interactions that control DAO's operations.

Alawadi et al. (2024) expand the set of theoretical perspectives by presenting two other theories:

- Stewardship Theory, as the antithesis of Agency Theory, offers a perspective for analyses which conditions create more balanced interests among different DAO's stakeholders, collaborating for the joint growth of the organization.
- Transaction-Cost Theory applies to DAOs because they can reduce market costs by offering a clear contractual framework that prevents investors from misinterpreting agreements.

Beck et al. (2018) also suggest that the theoretical framework of IT governance offers valuable guidance for discussing governance within the blockchain economy, encompassing DAOs as full-digital organizations.

Ding et al. (2021) mentions Parallel Intelligence Theory as a relevant theoretical and practical framework for DAO governance, offering solutions to challenges arising from multiple decision-making agents operating in uncertain environments.

Organizational theory also offers valuable insights into the dynamics of community governance within DAOs. This theory explores how organizations function, evolve, and respond to external...

factors. By examining various organizational perspectives and frameworks, it can offer more understanding of DAO structure, behavior, and adaptation (ASU, 2023).

Even though DAOs are usually described as ideal for democratic governance and resource management, mistrust and questionable incentives typically drive them into practice. Instead of collective stewardship for the common good, DAOs often function as systems of checks and balances to manage potential conflicts and protect diverse stakeholders' interests, aligning more closely with traditional agency theory (Alawadi et al., 2024).

3.2 Key players in DAO community and governance

Understanding the key stakeholders involved in DAO community governance is crucial for effective decision-making and community development (RQ 2). DAOs introduce a novel way to work by fostering voluntary collaboration within decentralized peer-to-peer communities.

Santana and Albareda (2022) and Alawadi et al. (2024) outlined that DAO members can assume distinct roles, such as:

- Founders initiate the DAO, establishing its objectives and rules for cryptocurrency investments;
- Investors offer crypto assets, receiving DAO's tokens that grant participation in decision-making;
- Developers contribute by designing, implementing, and refining the DAO's business logic within smart contracts;
- Miners/Validators support the blockchain infrastructure by processing, validating, and storing members' transactions.

Azouvi et al. (2019) highlight the substantial influence developers hold in blockchain-based organizations. As they are responsible for translating proposals into code, they can potentially manipulate decisions to serve their own interests (Zhao et al., 2022).

3.3 Engaging the DAO community

A thriving DAO community requires active engagement from its members (RQ 3). Due to the possibility of anonymous participation in DAOs, it is difficult to guarantee the engagement and responsibility of participants (Tamai & Kasahara, 2024). Malicious members can exploit the organization's reputation and community trust for their own benefit, engaging in short-term, high-risk activities to generate quick profits, potentially endangering the long-term sustainability of the DAO (Li & Chen, 2024).

Membership engagement reinforces the interests of both DAO actors and the overall organization. A robust incentive structure increases the likelihood of sustained attention and effort from co-investors, potentially deepening their commitment and engagement over time. Ellinger et al. (2024) suggest fostering a shared stake in the DAO's success by rewarding mutually beneficial activities through dual-value tokenization.

DAOs heavily rely on vesting to engage founders, contributors, and external token holders. To address the issue of members quickly selling their tokens, Davidson (2023) proposes linking vesting contracts to the token's value, not just time.

As proposed by Davidson (2023), when someone joins a DAO as a contributor and receives native tokens, these tokens aren't immediately liquidable. Instead, a vesting contract determines when and how the tokens become available for liquidation based on time or value. This approach enables an alignment of compensation with performance, encourages long-term commitment, and reflects the quality of contributions.

Gilson and Bourage (2024) also suggest some strategies to boost member engagement, such as:

- gamify voting: introduce rewards and competitive elements to make voting more fun;
- simplify proposals: use plain language, visuals, and interactive formats to make proposals accessible to a wider range of token holders;
- increase effective communication: encourage open dialogue between token holders and developers, providing clear and accessible information on DAO rules, proposals, and decision-making procedures;
- allow plenty of time for decisions: encourage members to gather information before making decisions, aiming to balance individual desires with the collective good.

Along with these practices, Liu et al. (2022) suggest that fostering social capital, sharing capital and psychological ownership, and organizing members based on their organizational experience can increase engagement in DAOs.

Voting power has an impact on engagement. For instance, the low perceived impact of individual votes in DAOs often discourages active participation. Alawadi et al. (2024) suggest a system where voting power diminishes over time for members who are inactive in the DAO, encouraging greater participation from more active members.

3.4 Decision and governance concentration

Despite their theoretically decentralized governance, DAOs often incorporate centralized elements in their structures (RQ 4). According to the empirical results of Gilson and Bourage (2024), DAO participants expressed significant concern about token concentration, considering this as a key issue within DAOs.

As outlined by Sun et al. (2024), despite aiming for decentralization, DAOs still exhibit centralized tendencies, with large token holders wielding considerable influence. This can increase the risk of collusion among key decision-makers.

As pointed by Beck et al. (2018) and Covarrubias e Covarrubias (2021), the centralized allocation of decision rights during the initial development phase of DAOs may result in substantial control and decision-making authority for the initial development team. This aspect was also observed by Liu et al. (2022) in their study on the DAO “Steemit.”

As pointed out by Santana and Albareda (2022), DAOs, while more decentralized than traditional organizations, often exhibit power imbalances as key figures like founders, major contributors, and developers maintain significant influence. This can lead to conflicts within the community, highlighting the limitations of DAO decentralization.

This reality is also exposed by Ellinger et al. (2024). While DAOs are often perceived as self-governance communities with commons objectives, they operate in a hybrid space between centralized and community-based governance. Decision-making power and influence within DAOs are concentrated in specific groups, revealing a complex internal structure that is neither fully centralized nor decentralized.

Another evidence of this reality is presented by Ellinger et al. (2023), which shows that one of the biggest DAOs, the MakerDAO, faces challenges in achieving decentralized governance. Despite its success as a stable coin project, internal conflicts arose due to differing member interests. To address this, MakerDAO committed to strengthening decentralization and community involvement. This experience highlights the difficulty of balancing central and decentralized structures in a DAO.

Even though in theory DAOs can be a completely decentralized entity, there is not an impediment to deliberate actions by influential members of the network that result in them taking control. As outlined by Augustin (2023), when a small fraction of the members is genuinely interested in participating in the decision-making and development process, there may be a loophole for the centralization of authority and decisions.

3.5 Voting limitations

Voting is a fundamental aspect of DAO governance, but it is not without limitations (RQ 5). According to Tamai and Kasahara (2024), DAOs face two main problems with their voting systems:

- members who own a substantial number of governance tokens, often called "whales," have much higher decision-making power;
- members can coordinate to manipulate votes using harmful tactics to get their way and benefit themselves.

With the objective of solving these two major problems, the authors proposed a mechanism to counter behaviors driven by participants' short-term self-interest, called "veToken." As proposed by Tamai and Kasahara (2024), this mechanism incentivizes participants to lock up their governance tokens for longer periods, increasing their voting power based on both the number of locked tokens and the duration of the lockup.

Besides this proposed mechanism, some DAOs allow token holders to delegate their voting rights, transferring them to trusted individuals or groups (Alawadi et al., 2024). This mechanism can encourage broader community participation and reduce voter apathy. However, it also poses the risk of power centralization, as a small number of representatives could potentially dominate the decision-making process (Axelsen et al., 2022).

Delegating voting rights can create a hierarchical structure within a DAO, contradicting its decentralized principles. Additionally, lobbyists can exert undue influence over voting processes, undermining democratic decision-making. DAOs should implement more inclusive decision-making frameworks, such as multi-stakeholder models, to ensure diverse representation and reduce the potential for manipulation (Alawadi et al., 2024).

Sun et al. (2024) found evidences of limitations in voting delegation practices within MakerDAO's governance polls. The way voting is delegated can significantly influence how DAOs are governed. When a small number of delegates hold a lot of voting power, it can lead to more heated debates, due to conflicting viewpoints.

Rikken et al. (2019) posit some challenges in voting systems in achieving equitable distribution of voting power. The foundational principle of "one person, one vote" is rendered problematic in conditions of anonymity or pseudonymity. Furthermore, the capacity for uninformed participation raises concerns regarding the quality of decision-making processes, a phenomenon sometimes referred to as mob rule or the tyranny of the majority.

Zhao et al. (2022) point to efficiency concerns in operational decision-making within Decentralized Autonomous Organizations (DAOs). Specifically, they argue that the inherent voting process can introduce inefficiencies when applied to routine operational decisions, which frequently necessitate rapid responses to dynamic market conditions.

4. Governance practices in DAOs

This section examines the governance aspects of five DAOs operating in public blockchain ecosystems, with a specific focus on addressing RQ 6 and considering the key aspects listed in Table 3.

4.1 Arbitrum

Launched in 2022, Arbitrum is a layer-2 blockchain operating on the Ethereum network. It employs a rollup protocol to enhance transaction speed and reduce costs while maintaining Ethereum's security guarantees.

The Arbitrum Constitution serves as the foundational framework. It outlines the core governance structure, defining roles, responsibilities, and decision-making authorities for all entities within the ecosystem (Arbitrum, 2025).

At the core of the governance system lies the Arbitrum DAO, governed by token holders and ruled by on-chain smart contracts along with three other governance entities.

The Arbitrum Foundation, which reviews proposals and actions to ensure they align with the Arbitrum Constitution and its own Memorandum of Association. Operating under the authority of a designated Governor contract, the Foundation manages a treasury to support the ecosystem.

The Arbitrum Security Council, composed of twelve elected members, this council is responsible for safeguarding the integrity, confidentiality, and availability of the Arbitrum network. The Council possesses emergency powers, allowing it to implement critical upgrades and initiate protocol changes when necessary.

The Arbitrum Data Integrity Committee focuses on managing the data availability of Arbitrum Nova, a network designed to facilitate lower transaction costs by operating under more relaxed trust assumptions.

4.2 GnosisDAO

Gnosis is a Decentralized Finance (DeFi) ecosystem specializing in the development of critical market infrastructure for DeFi solutions. Established in 2020, GnosisDAO serves as the collective steward of the Gnosis ecosystem, leveraging its products to guide development, support, and governance decisions.

The GnosisDAO governance model is predicated on principles of transparency, broad-based participation, and inherent adaptability. GnosisDAO's governance framework is structured around a multi-stage proposal lifecycle encompassing initial community deliberation, formal articulation, and decisive on-chain execution (Gnosis, 2025).

Prospective proposals are first introduced as informal drafts within the community forum, fostering an environment for open dialogue and iterative feedback. This preliminary phase of collective discussion ensures that evolving proposals resonate with the diverse perspectives and address the multifaceted needs of the stakeholder community.

The DAO's governance process is organized into three distinct phases: the origination and iterative refinement of novel proposals, the subsequent formalization of promising concepts through the standardized Gnosis Improvement Proposal (GIP), and the final on-chain voting phase.

The GNO token plays a pivotal role within this ecosystem, empowering stakeholders with voting rights, underpinning network security through staking mechanisms, and aligning economic incentives across the decentralized platform. The community of GNO token holders exercises governance over the development, funding, and overall direction of the Gnosis ecosystem.

4.3 Mantle

Launched in 2023, Mantle Network is an Ethereum Layer 2 scaling and lower cost blockchain solution in comparison to Ethereum. The governance of the ecosystem is made by the governance-focused DAO called Mantle DAO, which is its sub-DAO structure, enabling specialized governance for core contributor teams, topical committees, voting delegation, and budget lines.

The Mantle DAO governance model embodies a hybrid approach that joins decentralized, community-led decision-making with agile, sometimes off-chain, implementation. It stands as an example of how DAOs can balance rigor and flexibility, ensuring that strategic and technical changes are both thoroughly deliberated and efficiently executed (Mantle, 2024).

Mantle's decision-making power lies directly with \$MNT token holders. They control major strategic levers such as launching new product lines, altering tokenomics, approving spending, and modifying governance parameters.

Changes to the network are formalized through Mantle Improvement Proposals (MIPs), which function similarly to statutes or corporate policies, allowing stakeholders to debate, improve, and eventually solidify the proposal before it moves to a formal vote.

After the initial discussion phase, proposals are put to an official vote on the Governance Module. Token holders then use their voting power to ratify or reject proposals. This step ensures that eve

significant decision reflects the collective will of the community and maintains transparency in the decision-making process.

Once approved, proposals are implemented either through automated on-chain code execution or via off-chain methods led by a core contributor team. Many implementations occur off-chain, highlighting a flexible approach that adapts to the nature of the proposed changes and the operational realities of the organization.

4.4 Optimism

Established in 2022, Optimism is an Ethereum Layer 2 blockchain for hosting decentralized applications encompassing a wide spectrum of crypto activities. The Optimism ecosystem employs a multi-layered approach that aims to balance the interests of token holders with broader community considerations.

The governance of the Optimism ecosystem is managed by the Optimism Collective, a governance-focused DAO that governs the protocol and its ecosystem, empowering community participation in decision-making. Along with the Optimism Collective, there are two distinct sub-DAOs (Optimism, 2024).

The Token House represents the token holders and is responsible for protocol upgrades, treasury management, and oversight of project directors. It operates through a delegated-voting system, incorporating non-binding committees to enhance decentralization and streamline decision-making.

The Citizen House, comprised of appointed and elected members, oversees funding, allocating grants to projects based on their ecosystem impact. Membership in the Citizen House is denoted by democratic voting and is legitimized by non-fungible tokens.

4.5 Uniswap

Established in 2019, Uniswap is a decentralized exchange operating on the Ethereum blockchain. It facilitates the trading of ERC20 tokens through a set of immutable smart contracts, prioritizing censorship resistance, security, and user self-custody.

The governance of Uniswap embodies a multi-stage process intended to foster collaborative protocol development involving diverse stakeholders. This structured approach facilitates decision-making through sequential phases encompassing public discourse, community sentiment assessment, and on-chain voting (Uniswap, 2024).

This phased method incorporates inherent checks and balances designed to ensure evaluation of proposals, mandating thorough debate and establishing voting thresholds aimed at reflecting substantial and broad-based consensus.

The Uniswap governance ecosystem incorporates several key procedural elements. The Governance Forum serves as a platform for discussions, collaborative development, and the incorporation of community input. Furthermore, tools such as Agora and Tally play a significant role in streamlining the proposal submission and voting processes, enabling participants to track the evolution of governance proposals and exercise their voting rights.

5. Proposed Framework

The proposed framework posits that DAO governance hinges on five dimensions: sustainable decentralization, decision accountability, centralization risk, voting limitation, and community engagement. In this section we describe the five dimensions of the framework illustrated in Figure 2.

5.1 Sustainable decentralization

This dimension considers the theoretical foundations and measurable metrics that underpin sustainable decentralization within DAOs.

Agency Theory outlines aligning incentives among stakeholders to mitigate potential conflicts of interest; Sociomateriality Theory highlights the interplay between social, technological, and material factors that shape DAO governance outcomes; and Stewardship Theory emphasizes the ethical responsibility of key stakeholders in fostering a sustainable and accountable ecosystem.

To measure the degree of decentralization can be used: the distribution of token ownership (e.g., through the Gini coefficient), the decentralization of decision-making power (e.g., accessibility of proposal initiation and voting), and the autonomy of sub-DAOs.

DAOs can strive towards a sustainable level of decentralization that fosters community ownership, minimizes the risk of centralization, and maximizes the benefits of decentralized governance.

5.2 Decision accountability

This dimension emphasizes transparency, responsibility, and rule-abiding decision-making within the DAO. It focuses on establishing mechanisms to track decisions, ensure accountability for actions, and maintain a prominent level of transparency and auditability.

A robust governance framework is essential for achieving decision accountability. This includes a well-defined constitution, a code of conduct, and a comprehensive set of rules that guide decision-making processes, outline member roles and responsibilities, and establish consequences for rule violations.

Transparency is crucial for building trust within the DAO. Public access to financial records, decision-making logs, and code repositories allows community members to verify the legitimacy of actions and identify potential irregularities.

Furthermore, on-chain voting records provide an immutable record of decision-making, enabling the verification of individual votes and the identification of potential voting irregularities. Reputation systems and robust dispute resolution processes can also enhance accountability by incentivizing responsible behavior and ensuring fair resolution of conflicts.

To assess the effectiveness of decision accountability mechanisms, some metrics can be used. These metrics include the frequency of rule violations and the consistent enforcement of penalties, the public availability of information and the ease of access to relevant data, and the incorporation of community feedback into decision-making processes.

By effectively implementing these mechanisms and regularly monitoring these metrics, DAOs can enhance decision accountability, build trust within the community, and ensure the long-term sustainability and success of the organization.

5.3 Centralization risk

Decentralization is a cornerstone of DAOs, aiming to distribute power and decision-making across a broad community. However, centralization risks can undermine this principle, leading to vulnerabilities and potential exploitation. This dimension focuses on identifying and mitigating these risks, ensuring the DAO remains truly decentralized and resilient.

Centralization risks can manifest in various forms within a DAO. For instance, a concentration of voting power among a small group of token holders can enable them to manipulate governance outcomes, compromising the interests of the broader community.

Similarly, reliance on a few key developers or core contributors can create single points of failure, making the DAO vulnerable to their actions or potential exit. Additionally, centralized control over critical infrastructure, such as the DAO's treasury or communication channels, can be exploited for malicious purposes.

To mitigate these risks, DAOs can implement a range of strategies. Token distribution mechanisms can be designed to encourage wider token ownership and prevent excessive concentration of voting power. This can be achieved through airdrops, community grants, or token vesting schedules.

Furthermore, fostering a diverse and inclusive community can ensure that a wide range of perspectives are considered in decision-making processes. Decentralized governance mechanisms, such as multi-signature wallets, can distribute control over critical functions, reducing the risk of single points of failure. Finally, transparent, and open-source development practices can enhance community trust and reduce the potential for malicious actors to exploit vulnerabilities.

By proactively addressing centralization risks, DAOs can strengthen their governance structures, enhance their resilience, and ensure that decision-making remains truly decentralized and aligned with the interests of the broader community.

5.4 Voting limitation

A critical aspect of DAO governance is ensuring fair and equitable participation in decision-making processes. However, several challenges can hinder effective voting within DAOs.

Voter apathy, characterized by low turnout and disengagement, can undermine the legitimacy of governance decisions. This apathy can stem from several factors, including the perceived complexity of governance processes, the lack of clear incentives for participation, and the feeling of insignificance in influencing collective outcomes.

Furthermore, information asymmetry can significantly impact voting outcomes. Unequal access to information and resources among voters can create an uneven playing field, where some

individuals are better informed and equipped to make informed decisions than others. This can lead to situations where well-informed actors manipulate or exploit less-informed voters.

The concept of rational abstention further complicates the voting landscape within DAOs. In situations where the perceived impact of an individual vote is negligible, rational actors may choose to abstain from voting altogether, leading to low voter turnout and potentially suboptimal outcomes.

To address these challenges, several solutions can be explored. Delegated voting mechanisms allow token holders to delegate their voting power to trusted representatives, potentially increasing participation and improving decision-making efficiency. Liquid democracy, a hybrid approach, combines direct and delegated voting, allowing individuals to choose whether to vote directly or delegate their power, providing greater flexibility and potentially increasing overall participation.

Finally, robust education and awareness campaigns are crucial to fostering informed and engaged voters. By educating voters on the importance of participation, the consequences of their voting decisions, and the intricacies of DAO governance, DAOs can empower their community members to make informed and responsible choices, strengthening the legitimacy and effectiveness of their governance structures.

5.5 Community engagement

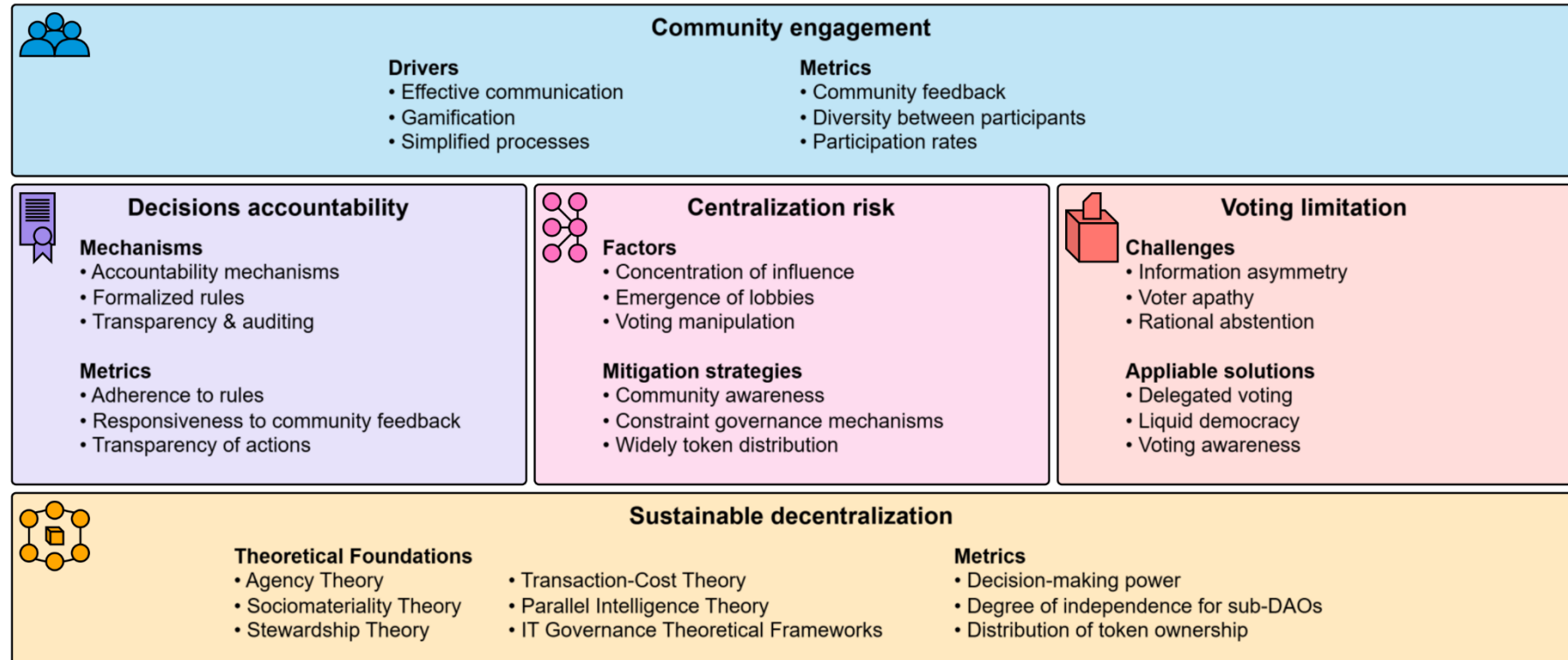
A vibrant and engaged community is the lifeblood of any successful DAO. This dimension focuses on fostering active and meaningful participation from all stakeholders. Effective communication channels, such as clear and accessible forums, social media groups, and regular updates, are crucial for keeping the community informed and engaged.

Furthermore, incorporating gamification elements, such as rewarding active participation, recognizing valuable contributions, and introducing playful challenges, can incentivize community members to actively contribute to the DAO's success. Streamlining processes, such as simplifying proposal submission, voting procedures, and decision-making mechanisms, reduces barriers to entry and encourages broader participation.

Key metrics for assessing community engagement include participation rates, such as voter turnout, proposal submission rates, and forum activity. Additionally, tracking the diversity of participants and ensuring representation from different stakeholders, demographics, and skill sets is crucial for fostering inclusivity and ensuring a well-rounded perspective. Monitoring community sentiment through sentiment analysis of forum discussions and social media mentions provides valuable insights into the overall health and morale of the community.

By prioritizing community engagement, DAOs can cultivate a thriving ecosystem where members feel valued, empowered, and motivated to actively contribute to the collective success of the organization.

Figure 2. Proposed conceptual framework to guide DAO's community governance.



6. Conclusions

Blockchain technology has revolutionized how we approach digital innovation and governance, and the emergence of DAOs has highlighted the need to carefully consider the potential obstacles of decentralized governance in order to build sustainable and thriving decentralized communities.

Although many articles consider DAO from the blockchain and smart contracts aspects, what we consider the “code level,” this article sought to address organizational aspects of DAOs, going beyond the level of functionalities and technical characteristics. In this sense, we hope to bring theoretical and practical contributions at the business level.

This study contributes to the growing body of knowledge on DAOs and their role in community governance. The findings contribute to the theoretical understanding of DAOs with the identification of DAOs governance aspects organized in the framework (Figure 2). To practitioners, it provides a valuable tool for DAO founders, developers, and community members to design and implement effective governance structures.

While significant academic attention has been directed towards the technical contributors, investors, and governance token holders of DAOs, the role of clients of DAO services remains understudied. The role and needs of DAO clients should also be considered for the long-term sustainability and success of these organizations.

To guide future research on community governance in DAOs, Table 4 presents a series of future research recommendations gleaned from the reviewed literature.

Table 4. Suggestions for future researchs

Questions for future researchers	Source
How do the dynamics of community governance modify DAO's smart contracts and overall structure?	Alawadi et. al (2024)
How can machine learning be effectively integrated into DAOs while considering the implications for community and governance?	Wang et. at (2019)
What additional mechanisms can be implemented to encourage active shareholder participation in DAOs without compromising decentralization?	Alawadi et. al (2024)
How can specialized consensus mechanisms be designed to effectively coordinate diverse stakeholders within DAOs?	Li and Chen (2024)
How can transparent decision-making processes be developed for DAOs to ensure democratic access to information and effectively monitor decision-making procedures?	Gilson and Bouraga (2024)
How can optimized notification systems and user-friendly platforms enhance DAO governance and participation?	Gilson and Bouraga (2024)
What are the opportunities, tensions, and challenges of work created by DAOs, and how do users respond to these dynamics?	Ellinger et. al (2024)

However, this work is not completely free of biases and limitations. Our database selection potentially excludes articles not indexed within those sources, and, despite a systematic method for literature review, subjective interpretations cannot be eliminated.

We acknowledge that snowballing in systematic literature reviews may still be limited by relying solely on randomized searches, which can introduce selection bias. Future research should explore diverse methodologies, interdisciplinary approaches, and larger article samples to address this issue.

The authors' decision for only English-language publications restricts findings on a global scale. DAOs are a worldwide phenomenon with a diverse user base; their adoption and related discussions can extend to other languages in future studies.

This study did not delve into the cybersecurity risks that could significantly influence community governance.

References

- Alawadi, A., Kakabadse, N., Kakabadse, A., & Zuckerbraun, S. (2024). Decentralized autonomous organizations (DAOs): Stewardship talks but agency walks. *Journal of Business Research*, 178, 114672. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2024.114672>
- Amend, J., Troglauer, P., Guggenberger, T., Urbach, N., & Weibelzahl, M. (2023). Facilitating cooperation of smallholders in developing countries: Design principles for a cooperative-oriented decentralized autonomous organization. *Information Systems and E-Business Management*. <https://doi.org/10.1007/s10257-023-00659-7>
- Anand, P., & Chauhan, A. (2020). The advent of ownerless businesses: Decentralised autonomous organisations. *International Journal of Scientific and Technology Research*, 9(2), 2848–2852.
- Arbitrum. (2025). *Arbitrum Portal*. <https://portal.arbitrum.io/>
- ASU. (2023, August 2). *Why Is Organizational Theory Important for Business?* Arkansas State University. <https://degree.astate.edu/online-programs/business/mba/management/organizational-theory-important-for-business/>
- Augustin, N., Eckhardt, A., & De Jong, A. W. (2023). Understanding decentralized autonomous organizations from the inside. *Electronic Markets*, 33(1), 38. <https://doi.org/10.1007/s12525-023-00659-y>
- Axelsen, H., Jensen, J. R., Department of Computer Science, University of Copenhagen, Universitetsparken 5, DK-2100 Copenhagen, Denmark, Ross, O., & Department of Computer Science, University of Copenhagen, Universitetsparken 5, DK-2100 Copenhagen, Denmark. (2022). When is a DAO Decentralized? *Complex Systems Informatics and Modeling Quarterly*, 31, 51–75. <https://doi.org/10.7250/csimq.2022-31.04>
- Azouvi, S., Maller, M., & Meiklejohn, S. (2019). Egalitarian Society or Benevolent Dictatorship: The State of Cryptocurrency Governance. In A. Zohar, I. Eyal, V. Teague, J. Clark, A. Bracciali, F. Pintore, & M. Sala (Eds.), *Financial Cryptography and Data Security* (Vol. 10958, pp. 127–143). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-58820-8_10

- Beck, R., Müller-Bloch, C., & King, J. L. (2018). Governance in the Blockchain Economy: A Framework and Research Agenda. *Journal of the Association for Information Systems*, 1020–1034. <https://doi.org/10.17705/1jais.00518>
- Buterin, V. (2014). *Ethereum: A Next-Generation Smart Contract and Decentralized Application Platform*. https://ethereum.org/669c9e2e2027310b6b3cdce6e1c52962/Ethereum_Whitepaper_-_Buterin_2014.pdf
- Chen, H., & Cai, W. (2023). A Comparative Analysis of Centralized and Decentralized Developer Autonomous Organizations Managing Conflicts in Discussing External Crises. *IEEE Transactions on Computational Social Systems*, 1–12. <https://doi.org/10.1109/TCSS.2023.3247464>
- Covarrubias, J. Z. L., & Covarrubias, I. N. L. (2021). Different types of government and governance in the blockchain. *Journal of Governance and Regulation*, 10(1), 8–21. <https://doi.org/10.22495/jgrv10i1art1>
- Davidson, S. (2023). Compensation in DAOs: A Proposal. *The Journal of The British Blockchain Association*, 6(2), 1–6. [https://doi.org/10.31585/jbba-6-2-\(4\)2023](https://doi.org/10.31585/jbba-6-2-(4)2023)
- DeepDAO. (2024). *DeepDAO*. DeepDAO – Discovery Engine for DAO Ecosystem. <https://deepdao.io/organizations>
- Ding, W., Liang, X., Hou, J., Li, J., Rouabah, Y., Yuan, Y., & Wang, F.-Y. (2023). A Novel Approach for Predictable Governance of Decentralized Autonomous Organizations Based on Parallel Intelligence. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 53(5), 3092–3103. <https://doi.org/10.1109/TSMC.2022.3224250>
- Ding, W. W., Liang, X., Hou, J., Wang, G., Yuan, Y., Li, J., & Wang, F.-Y. (2021). Parallel Governance for Decentralized Autonomous Organizations enabled by Blockchain and Smart Contracts. *2021 IEEE 1st International Conference on Digital Twins and Parallel Intelligence (DTPI)*, 1–4. <https://doi.org/10.1109/DTPI52967.2021.9540069>
- Ellinger, E., Gregory, R., Mini, T., Widjaja, T., & Henfridsson, O. (2024). Skin in the Game: The Transformational Potential of Decentralized Autonomous Organizations. *MIS Quarterly*, 48(1), 245–272. <https://doi.org/10.25300/MISQ/2023/17690>
- Ellinger, E. W., Mini, T., Gregory, R. W., & Dietz, A. (2023). Decentralized Autonomous Organization (DAO): The case of MakerDAO. *Journal of Information Technology Teaching Cases*. <https://doi.org/10.1177/20438869231181151>
- Erceg, A., Sekuloska, J. D., & Kelić, I. (2020). Blockchain in the Tourism Industry—A Review of the Situation in Croatia and Macedonia. *Informatics*, 7(1), 5. <https://doi.org/10.3390/informatics7010005>
- Gilson, C., & Bouraga, S. (2024). Enhancing the democratic nature of voting processes within decentralized autonomous organizations. *Digital Policy, Regulation and Governance*, 26(2), 169–187. <https://doi.org/10.1108/DPRG-09-2023-0126>
- Gnosis. (2025). *Gnosis*. <https://www.gnosis.io/dao>
- Hsieh, Y.-Y., Vergne, J.-P., Anderson, P., Lakhani, K., & Reitzig, M. (2018). Bitcoin and the rise of decentralized autonomous organizations. *Journal of Organization Design*, 7(1), 1–14. <https://doi.org/10.1186/s41469-018-0038-1>

- Kitchenham, B. (2004). Procedures for Performing Systematic Reviews. *Keele University Technical Report*, 33, 1–26.
- Li, S., & Chen, Y. (2024). Governing decentralized autonomous organizations as digital commons. *Journal of Business Venturing Insights*, 21, e00450. <https://doi.org/10.1016/j.jbvi.2024.e00450>
- Liu, L., Zhou, S., Huang, H., & Zheng, Z. (2021). From Technology to Society: An Overview of Blockchain-Based DAO. *IEEE Open Journal of the Computer Society*, 2, 204–215. <https://doi.org/10.1109/OJCS.2021.3072661>
- Liu, Z., Li, Y., Min, Q., & Chang, M. (2022). User incentive mechanism in blockchain-based online community: An empirical study of steemit. *Information & Management*, 59(7), 103596. <https://doi.org/10.1016/j.im.2022.103596>
- Mantle. (2024). *Mantle Governance Overview*. <https://docs.mantle.xyz/governance>
- Nakamoto, S. (2008). *Bitcoin: A Peer-to-Peer Electronic Cash System*. <https://bitcoin.org/bitcoin.pdf>
- Oguntegbe, K. F., Di Paola, N., & Vona, R. (2023). Traversing the uncommon boulevard: Entrepreneurial trajectory of decentralised autonomous organisations (DAOs). *Technology Analysis & Strategic Management*, 1–17. <https://doi.org/10.1080/09537325.2023.2200857>
- Optimism. (2024). *Optimism Collective*. Optimism Collective. <https://gov.optimism.io/>
- Pacheco, M. N. J. (2019). De la tecnología blockchain a la economía del token. *Derecho PUCP*, 83, 61–87. <https://doi.org/10.18800/derechopucp.201902.003>
- Pancić, M., Ćučić, D., & Serdarušić, H. (2023). Business Intelligence (BI) in Firm Performance: Role of Big Data Analytics and Blockchain Technology. *Economies*, 11(3), 99. <https://doi.org/10.3390/economies11030099>
- Poeschl, A. (2023). Longitudinal evidence of entrepreneurial behaviour in a blockchain-based decentralized autonomous organization: Case study of the Nano cryptocurrency. *Entrepreneurial Business and Economics Review*, 11(4), 171–185. <https://doi.org/10.15678/EBER.2023.110411>
- Rausser, G., Choi, E., & Bayen, A. (2023). Public–private partnerships in fostering outer space innovations. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 120(43), e2222013120. <https://doi.org/10.1073/pnas.2222013120>
- Riaza, B. P., & Gnabo, J.-Y. (2023). Decentralized Autonomous Organizations (DAOs): Catalysts for enhanced market efficiency. *Finance Research Letters*, 58, 104445. <https://doi.org/10.1016/j.frl.2023.104445>
- Rikken, O., Janssen, M., & Kwee, Z. (2019). Governance challenges of blockchain and decentralized autonomous organizations. *Information Polity*, 24(4), 397–417. <https://doi.org/10.3233/IP-190154>
- Santana, C., & Albareda, L. (2022). Blockchain and the emergence of Decentralized Autonomous Organizations (DAOs): An integrative model and research agenda. *Technological Forecasting and Social Change*, 182, 121806. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2022.121806>
- Singh, M., & Kim, S. (2019). Blockchain technology for decentralized autonomous organizations. In *Advances in Computers* (Vol. 115, pp. 115–140). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/bs.adcom.2019.06.001>

- Sun, X., Stasinakis, C., & Sermpinis, G. (2024). Decentralization illusion in Decentralized Finance: Evidence from tokenized voting in MakerDAO polls. *Journal of Financial Stability*, 73, 101286. <https://doi.org/10.1016/j.jfs.2024.101286>
- Tamai, S., & Kasahara, S. (2024). DAO voting mechanism resistant to whale and collusion problems. *Frontiers in Blockchain*, 7, 1405516. <https://doi.org/10.3389/fbloc.2024.1405516>
- Uniswap. (2024). *Uniswap Foundation*. <https://www.uniswapfoundation.org/governance>
- Wang, S., Ding, W., Li, J., Yuan, Y., Ouyang, L., & Wang, F.-Y. (2019). Decentralized Autonomous Organizations: Concept, Model, and Applications. *IEEE Transactions on Computational Social Systems*, 6(5), 870–878. <https://doi.org/10.1109/TCSS.2019.2938190>
- Wright, S. A. (2023). DAOs & ADSs. *2023 IEEE 15th International Symposium on Autonomous Decentralized System (ISADS)*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/ISADS56919.2023.10091973>
- Zhao, X., Ai, P., Lai, F., Luo, X. (Robert), & Benitez, J. (2022). Task management in decentralized autonomous organization. *Journal of Operations Management*, 68(6–7), 649–674. <https://doi.org/10.1002/joom.1179>

APÊNDICE B – ARTIGO II

XLIV ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO
"Reindustrialização no Brasil"
Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil, 22 a 25 de outubro de 2024.

ANÁLISE DE ASPECTOS ESTRATÉGICOS PARA APLICAÇÃO DE BLOCKCHAIN NA GESTÃO DE LIXO ELETRÔNICO NO BRASIL

Thomaz Henrique Viaro Bridi (Universidade Paulista)

Rodrigo Franco Gonçalves (Universidade Paulista)



O desenvolvimento tecnológico contínuo resulta na crescente geração de resíduos eletrônicos. A lida com esse tipo de resíduo implica em desafios não apenas relacionados a sustentabilidade, mas também desafios técnicos para controle de quantias geradas, coleta e reciclagem. Políticas e sistemas para gestão e logística reversa eficazes, incentivadores e colaborativos são de grande importância para garantir a eficácia. Nesse contexto, esse artigo analisa fatores estratégicos sobre a aplicação da tecnologia blockchain para sistemas de logística reversa de resíduos eletrônicos, considerando o contexto brasileiro e a legislação vigente. Este artigo conclui que a adoção da tecnologia blockchain, especificamente de protocolos que permitem o armazenamento e processamento de informações de maneira descentralizada, pode ser uma base técnica para viabilizar redes colaborativa de logística reversa e facilitar interações comerciais. A aplicação da tecnologia blockchain na coleta e reciclagem de resíduos eletrônicos também pode trazer benefícios e inovações para a cadeia de valor, viabilizando soluções de rastreabilidade, confiabilidade, eficiência, inclusão social e sustentabilidade.

Palavras-chave: Logística Reversa, Política Nacional de Resíduos Sólidos, Sustentabilidade, Tecnologia de Razão Distribuída.

1. Introdução

O desenvolvimento tecnológico contínuo junto a fatores como novas exigências de mercado e obsolescência programada resultam na crescente geração de resíduos eletrônicos. Essa categoria de resíduo sólido, também conhecido como *e-waste*, contempla equipamentos tecnológicos que atingiram o fim do seu ciclo de vida funcional, estão obsoletos ou danificados sem viabilidade de reparo ("WHO", 2023; PARLIAMENT, 2012).

A lida com esse tipo de resíduo implica em desafios não apenas relacionados a sustentabilidade, mas também desafios técnicos para controle de quantias geradas, coleta e reciclagem, visando reduzir impactos socioeconômicos causados pelo descarte inadequado e a contaminação por metais pesados e demais substâncias tóxicas presentes nesse tipo de resíduo (DASAKLIS; CASINO; PATSAKIS, 2020; NEEDHIDASAN; SAMUEL; CHIDAMBARAM, 2014; SAHOO; HALDER, 2020).

Em 2016, a produção global de *e-waste* foi estimada em 44,7 milhões de toneladas, porém apenas 20% dos resíduos foram destinados a meios adequados de reciclagem ou tratamento (DASAKLIS; CASINO; PATSAKIS, 2020; DUA et al., 2020; GUPTA; BEDI, 2018). Essa situação resulta ao fato que o *e-waste* representa a maioria dos resíduos tóxicos despejados em aterros e lixões (ABDELBASIR et al., 2018; HOLGATE, 2018; NETO; SILVA; SANTOS, 2019; WOF, 2019). Além do mais, o descarte errático de *e-waste* também representa um prejuízo econômico significativo devido à perda de matérias-primas valiosas (NETO; SILVA; SANTOS, 2019). Em 2016, foi estimado o valor de 55 bilhões de euros em matérias-primas presentes em resíduos eletrônicos (DASAKLIS; CASINO; PATSAKIS, 2020).

Políticas e sistemas para gestão e logística reversa eficazes e incentivadores, onde fabricantes, retalhistas, clientes e centros de reciclagem formam uma rede colaborativa com benefícios mútuos, são de grande importância (DUA et al., 2020). Entretanto, tais políticas e sistemas são majoritariamente complexos e ineficazes devido à fatores limitantes, como a falta de comunicação entre agentes, carência de infraestrutura e atividades profissionais irregulares (SAHOO; HALDER, 2020).

Sistemas de logística reversa para resíduos eletrônicos, quando existentes, comumente apresentam limitações como a falta de transparência sobre canais de coleta, dificuldade no cálculo das quantias de *e-waste* recuperado, ineficácia em meios de incentivo e limitações em validar a coleta adequada (DUA et al., 2020; SHAHABUDDIN et al., 2023). A tecnologia *blockchain* pode proporcionar soluções mais eficazes para essa realidade, viabilizando mecanismos para colaboração, processos mais automatizados e compartilhamento de dados

(ALEXANDRIS et al., 2018; BUTERIN, 2014).

Seguindo esse contexto, esse artigo analisa fatores estratégicos sobre a aplicação da tecnologia *blockchain* para sistemas de logística reversa de resíduos eletrônicos, considerando o contexto brasileiro e a legislação vigente, em específico, o Decreto nº10.240, parte da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), o qual estabelece requisitos para o desenvolvimento de sistemas de logística reversa para *e-waste*. Essa análise visa desenvolver os seguintes artefatos:

- a) uma análise relacionando fatores limitantes presentes no Brasil, requisitos do Decreto nº10.240 e as capacidades da tecnologia *blockchain* passíveis de possibilitarem soluções e adequações nesse contexto;
- b) uma análise SWOT sobre a aplicação da tecnologia *blockchain* para projetos de sistemas de logística reversa para resíduos eletrônicos.

Esse trabalho está organizado nas seguintes seções: a seção 2 apresenta o contexto-problema, com uma revisão sobre a realidade da gestão de *e-waste* no Brasil e legislação vigente. A seção 3 apresenta o contexto-solução, descrevendo a tecnologia *blockchain*, suas capacidades e aplicabilidades na gestão de logística de lixo eletrônico. A seção 4 descreve os métodos adotados para realização das análises. A seção 5 apresenta os resultados junto a discussão com a literatura e a seção 6 as conclusões.

2. Revisão da legislação e sobre o lixo eletrônico no Brasil

O Brasil é o segundo maior produtor de lixo eletrônico no continente americano (DOS SANTOS et al., 2021; NETO; SILVA; SANTOS, 2019). Em 2016, a Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial (ABDI) estimou uma produção per capita de lixo eletrônico em cerca de 7,2 kg (NETO; SILVA; SANTOS, 2019) e, em 2019, segundo dados da OCDE (2021) a produção per capita foi em cerca de 10,2 kg.

Todavia, não há dados confiáveis sobre coleta e reciclagem de *e-waste* no Brasil. Como apontado por Ghosh et al. (2016), devido à complexidade e deficiências nos processos de gestão de resíduos, é muito difícil estimar as quantias recicladas de *e-waste* no Brasil. A carência de dados se deve, dentre outros fatores, a presença de um amplo mercado informal de produtos eletrônicos e deficiências presentes nas redes de logística reversa existentes (NETO; SILVA; SANTOS, 2019).

Como apontado por Dias et al. (2018), o governo brasileiro não possui um controle efetivo sobre as atividades de reciclagem do *e-waste* (NETO; SILVA; SANTOS, 2019), os quais



também são dificultados pela ausência de sistemas de gestão eficientes (DE OLIVEIRA NETO; DE JESUS CARDOSO CORREIA; SCHROEDER, 2017; GOVINDAN et al., 2013). Junto a isso, o Brasil possui poucos programas de gestão de resíduos em atividade (SOUZA et al., 2016), além da falta incentivos para engajar entidades privadas e ações de controle fiscalizador são majoritariamente ineficazes (ALVES et al., 2021).

Essa situação demonstra a necessidade de inovações capazes de suprir tais dificuldades, promover uma maior colaboração dos agentes envolvidos na cadeia produtiva e permitir dados mais acurados.

A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) estabelece um conjunto de princípios, objetivos, instrumentos e ações para a gestão de resíduos em território nacional (BRASIL, 2010). Além de definir, pelo Decreto nº10.240, normas para a implementação de sistemas de logística reversa para produtos eletroeletrônicos de uso doméstico (BRASIL, 2020). A logística reversa é um conjunto de ações que viabilizam o descarte, coleta e reciclagem, garantindo a destinação adequada dos resíduos gerados (DOS SANTOS et al., 2021).

O Decreto nº10.240 estabelece que fabricantes, importadores, distribuidores e comerciantes de produtos eletrônicos implementem sistemas e processos para logística de resíduos, além de incluir os consumidores como responsáveis pela separação e entrega desses resíduos em pontos de coleta (ALVES et al., 2021), estabelecendo o conceito de Responsabilidade Compartilhada, todos os agentes envolvidos têm responsabilidades em relação à gestão dos resíduos gerados.

Todavia, a legislação por si, não é capaz de garantir o atendimento dos requisitos impostos, visto que a coleta e reciclagem são frequentemente dificultados por incompatibilidades entre diretrizes estabelecidas e fatores práticos limitantes (PAES et al., 2016). Além do mais, ações de longo alcance voltadas à implementação de sistemas de logística reversa em acordo com a legislação são praticamente inexistentes (NETO; SILVA; SANTOS, 2019).

3. A tecnologia *blockchain* e sua aplicação em gestão de resíduos

A tecnologia *blockchain* foi popularizada por sua aplicação no trabalho de Nakamoto (2008), o qual a utilizou como base para um protocolo digital de pagamentos descentralizados por meio de uma criptomoeda nomeada Bitcoin. Essa tecnologia recebe esse nome dado que um conjunto de transações recebe o nome de “bloco” e cada bloco sempre referência o bloco diretamente anterior, formando uma cadeia (*chain*, em inglês) de blocos (PACHECO, 2019).

A *blockchain* é uma tecnologia de razão distribuída (*Distributed Ledger Technology* – DLT)

que permite a atualização, compartilhamento e validação de dados por meio de transações incrementais e imutáveis, anunciadas abertamente numa rede ponto-a-ponto e mantendo um rastro histórico contínuo das transações realizadas entre agentes (DWIVEDI et al., 2021; ELLINGER et al., 2023; MOUGAYAR, 2017).

Uma rede *blockchain* pode ser compreendida como um banco de dados distribuído, gerido de maneira independente por cada unidade computacional participante da rede e atualizado por meio dum protocolo de sincronização pré-definido, sem a necessidade de uma entidade mediadora para transmissão ou validação de transações (BONILLA, 2023, p. 90; FAQIR-RHAZOU; ARROYO; HASSAN, 2021).

Como apresentado por Hooper (2018) e percorrido por França et al. (2020), Kutsyk et al. (2020) e Petroni et al. (2020), os benefícios e capacidades da tecnologia *blockchain* podem ser resumidos em cinco tópicos principais: maior transparência, maior segurança, melhor rastreabilidade, maior eficiência e redução de custos em processos automatizados e, como descrito por (KUTSYK; REDCHENKO; VORONKO, 2020), *blockchain* pode proporcionar meios técnicos para o desenvolvimento de canais de comunicação abertos, facilitando o envolvimento de agentes e compartilhamento de informações.

Todavia, é importante considerar que, como apontado por Wang et al. (2019), técnicas e soluções baseadas em *blockchain* ainda estão numa fase inicial de desenvolvimento e existem limitações técnicas consideráveis como imutabilidade de manutenção em processos geridos por código, modelos de arquitetura pouco estabelecidos e custos para utilização de redes *blockchain* públicas, por exemplo, redes baseadas no protocolo Ethereum, desenvolvido por Buterin (2014).

No âmbito da literatura acadêmica, uma variedade de trabalhos acadêmicos apresenta potenciais e propostas de aplicação da tecnologia *blockchain* e seus derivados na gestão de resíduos eletrônicos. Pode-se citar o trabalho de Gupta e Bedi (2018), tendo como escopo o território indiano, propondo soluções baseadas em *blockchain* para o rastreamento de *e-waste* e mecanismos para incentivar a reciclagem ou descarte adequado.

O trabalho de Sahoo e Halder (2020) apresenta um modelo para sistema para gestão de *e-waste* baseado em *blockchain*, buscando abranger todo o ciclo de vida de produtos, desde a fabricação até a reciclagem e Damadi e Namjoo (2021) discorre sobre a gestão inteligente de resíduos, usando uma combinação de *edge computing* e *blockchain* para criar um ambiente digital onde organizações focadas na gestão de resíduos tenham acesso a mecanismos de incentivo.



Sob o escopo brasileiro, a aplicação da tecnologia *blockchain* foi explorada em trabalhos como de França et al. (2020) que propõe o uso dessa tecnologia para melhorar a gestão de resíduos em pequenos municípios, Joshi et al. (2023) que identifica desafios de implementação da tecnologia *blockchain* na gestão de resíduos em países em desenvolvimento, como o Brasil e Guzzo et al. (2022) que analisa como projetar políticas públicas que incentivem a Economia Circular estudando a eficácia do programa brasileiro de coleta de resíduos elétricos e eletrônicos.

4. Método

Nessa seção, é descrito como as duas análises apresentadas por esse artigo foram elaboradas, tais análises adotam uma abordagem de análise teórica, utilizando-se de análise documental e revisão de literatura. A análise documental se concentra no Decreto nº10.240 e a revisão de literatura descreve a tecnologia *blockchain*, desafios da gestão de lixo eletrônico no Brasil e as potenciais aplicações da tecnologia *blockchain* no enfrentamento desses desafios.

4.1. Análise relacionando a legislação, o cenário brasileiro e a tecnologia *blockchain*

Essa análise foi elaborada com a finalidade de resultar numa representação visual considerando três domínios:

1. requisitos do Decreto nº10.240, sobre a obrigatoriedade de sistemas de logística reversa para resíduos eletrônicos;
2. fatores limitantes presentes na realidade brasileira da gestão de *e-waste*, considerando a literatura apresentada no referencial teórico; e
3. capacidades que a tecnologia *blockchain* pode oferecer, integrando capacidades da tecnologia exploradas por França et al. (2020), Kutsyk et al. (2020) e Petroni et al. (2020) nos tópicos sumarizados por Hooper (2018).

Os itens foram selecionados para essa análise considerando a possibilidade da tecnologia *blockchain* prover aplicações e soluções passíveis de atendê-los. A (Tabela 1) apresenta os itens selecionados para o domínio de fatores limitantes no cenário brasileiro e a (2) apresenta os requisitos do Decreto Nº10.240 selecionados.

Tabela 1 - Fatores limitantes presentes no Brasil relacionados a gestão e logística de resíduos eletrônicos.

Fatores limitantes	Referencial bibliográfico
Dificuldade em estimar quantias de <i>e-waste</i> coletados ou reciclados	(GHOSH et al., 2016)
Ausência de fiscalização sobre as atividades de coleta e reciclagem de <i>e-waste</i>	(DIAS et al., 2018)
Presença de um amplo mercado informal de produtos eletrônicos	(NETO; SILVA; SANTOS, 2019)
Carência de programas para gestão de resíduos eletrônicos	(SOUZA et al., 2016)
Falta de incentivos para engajamento de entidades privadas	(ALVES et al., 2021)

Fonte: elaborado pelos autores (2024)

Tabela 2 - Requisitos e conceitos presentes no Decreto nº10.240 que foram selecionados para análise.

Item selecionado	Seção onde o item é citado
Artigo 6º	Capítulo II - Do objetivo
parágrafo II	Art. 33º - Obrigações de fabricantes
Parágrafos I e II	Art. 34º - Obrigações de importador
Parágrafo I	Art. 35º - Obrigações de distribuidor
Parágrafo II	Art. 36º - Obrigações de comerciante
Artigo 56º	Capítulo XV - Avaliação e monitoramento do sistema

Fonte: baseado em Brasil (2020)

4.2. Análise SWOT da aplicação de *blockchain* na gestão de *e-waste*

O método SWOT é uma forma de análise útil em áreas como administração, engenharia, tecnologia, entre outras. O termo SWOT é um acrônimo em inglês para as quatro dimensões consideradas: Forças, Fraquezas, Oportunidades, Ameaças. Identificar os fatores dentro dessas quatro dimensões visa possibilitar uma visão mais holística do contexto observado, além de ajudar no planejamento estratégico e servir de apoio para a tomada de decisões (RENAULT, [s.d.]).

A análise SWOT elaborada nesse trabalho baseia-se na literatura apresentada na seção de referência teórico. A alocação dos itens dentro das quatro dimensões da matriz SWOT foi realizado aplicando a seguinte lógica de classificação para cada dimensão:



- Forças: capacidades da tecnologia *blockchain* que podem gerar valor com sua aplicação sistemas;
- Fraquezas: limitações presentes no atual leque de ferramentas e técnicas para aplicação de *blockchain*;
- Oportunidades: possibilidades de cocriação de valor entre agentes envolvidos em sistemas utilizando-se de capacidades da tecnologia *blockchain*;
- Ameaças: fatores e riscos externos a serem considerados na adoção de tecnologia *blockchain*.

5. Resultados e discussões

5.1. Sobre o mapeamento entre fatores limitantes, legislação e a tecnologia *blockchain*

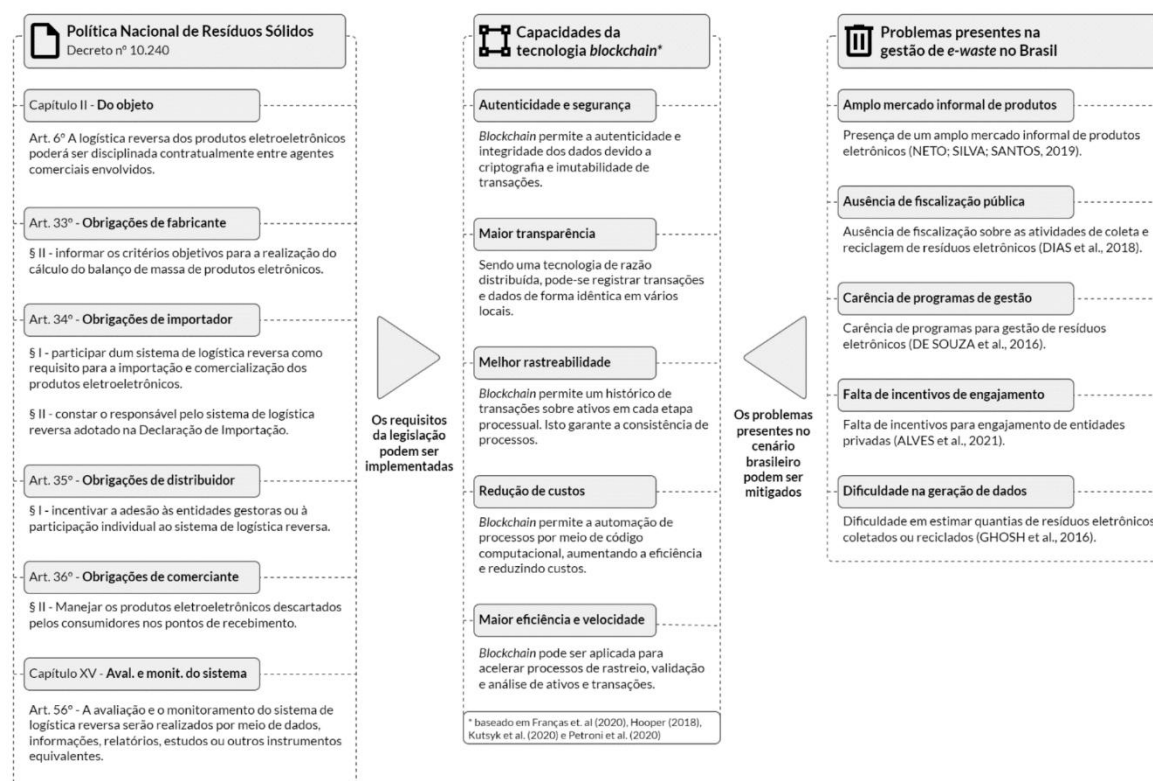
A (Figura 1) expõe a representação visual da análise que relaciona os fatores limitantes no Brasil, requisitos vigentes no Decreto nº10.240 e capacidades da tecnologia *blockchain*. Observa-se que alguns requisitos presentes no decreto podem ser implementados ou automatizadas pelo uso de *blockchain*, por exemplo, a emissão de relatórios, sendo que a gestão de dados de forma descentralizada entre agentes. Observa-se também a possibilidade do uso dessa tecnologia em soluções que permitam a melhor quantificação de matéria-prima recuperada no processo de reciclagem.

A funcionalidade de quantificação de material que pode ser recuperado permitiria estimativas maior acurácia e menores custos. Isso pode ser um viabilizador para maior colaboração entre partes interessadas, como apontado por Dua et al. (2020), maior capacidade preditiva e de decisão, como requerida por órgãos como a ABDI e adesão a programas e sistemas de logística reversa de resíduos eletrônicos.

Segundo Ghosh et al. (2016), dados sobre resíduos eletrônicos são frequentemente escassos. A tecnologia *blockchain* permite o desenvolvimento de sistemas de informação distribuídos, considerando que agentes poderia armazenar e acessar dados dentro de uma rede *blockchain* sem depender de intermediários. Junto a isso, pode-se viabilizar programas de incentivos por meio de *tokens* e ações de controle mais eficientes, corroborando para mitigar os problemas presentes no cenário brasileiro descritos por Souza et al. (2016) e Alves et al. (2021).

Considerando a adoção de uma rede *blockchain* de acesso aberto, pode-se pensar no desenvolvimento de sistemas e protocolos padronizados e mais acessíveis, facilitando que agentes possam colaborar mutuamente, como também meios de incentivo para que agentes não governamentais busquem estar em acordo com a legislação vigente.

Figura 1 - Análise de relações entre requisitos da legislação, fatores limitantes no cenário brasileiro e a tecnologia *blockchain*. No lado esquerdo são apresentados os requisitos, no lado direito, os fatores limitantes segundo a literatura e ao centro, estão resumidos as capacidades da tecnologia *blockchain*, usando como base em cinco tópicos sumarizados a partir de França et al. (2020), Hooper (2018), Kutsyk et al. (2020) e Petroni et al. (2020).



Fontes: elaborado pelos autores (2024)

5.2. Sobre a análise SWOT da aplicação da tecnologia blockchain na gestão de *e-waste*

A (Figura 2) apresenta a matriz SWOT resultante da análise realizada. A adoção da tecnologia blockchain apresenta um leque de fatores positivos, acompanhados de riscos a serem considerados. A tecnologia pode viabilizar redes para agentes envolvidos no processo de gestão do lixo eletrônico pode vir a facilitar interações comerciais. Como apontado por Anand e Chauhan (2020), a tecnologia *blockchain* possibilita o consenso sem a necessidade da posse de tais dados por uma entidade centralizada. A criação um ecossistema colaborativo tem o potencial de promover a inovação e a eficiência, em comparação a proposta de sistemas "tradicionais".

Todavia, como apontado por Wang et al. (2019), técnicas e soluções baseadas em *blockchain* ainda estão numa fase inicial de desenvolvimento e existem limitações técnicas consideráveis, por exemplo, poucas funcionalidades de integração com sistemas de informações, poucas boas-práticas de segurança comprovadas e limitações técnicas em automações geridas por código.

Figura 2 - Análise SWOT sobre a aplicação da tecnologia *blockchain* para soluções de gestão de resíduos eletrônicos, sob o contexto brasileiro.

	Fatores positivos	Fatores negativos
Fatores internos	<p> Forças</p> <ul style="list-style-type: none"> Automatizar processos digitalizados, aumentando a eficiência do sistema. Possibilitar sistemas de logística reversa mais transparente e democratizados. Viabilizar mecanismos descentralizados para rastreabilidade de resíduos. 	<p> Fraquezas</p> <ul style="list-style-type: none"> Barreira de aceitação ou apoio das partes envolvidas. Carência de arquiteturas e padrões comprovados. Custos elevados para desenvolvimento de soluções duradouras. Introdução de conceitos e técnicas ainda pouco difundidos.
Fatores externos	<p> Oportunidades</p> <ul style="list-style-type: none"> Apoio a pesquisa e desenvolvimento tecnológico no setor de reciclagem. Criação de canais de conscientização da sociedade civil. Criação de incentivos em formatos digitais, como criptoativos e tokens. Formação de parcerias público-privadas com maior confiança entre partes envolvidas. 	<p> Ameaças</p> <ul style="list-style-type: none"> Ameaças de segurança cibernética impactam severamente redes blockchain. Carência de mão-de-obra especializada. Ferramentas de desenvolvimento ainda em fase embrionária. Risco de vulnerabilidades para ações e decisões mal-intencionadas.

Fonte: elaborado pelos autores (2024).

6. Conclusões

Com o desenvolvimento tecnológico acelerado, lidar com resíduos eletrônicos implica em desafios de possibilitar coleta e reciclagem, a fim de mitigar impactos ambientais, econômicos e sociais.

Esse artigo analisou de fatores estratégicos para a aplicação da tecnologia *blockchain* para sistemas de logística reversa de resíduos eletrônicos, considerando o contexto brasileiro e a legislação aplicada, especificamente o Decreto nº10.240, sobre a implantação de sistemas de logísticas reversas para resíduos eletrônicos. A (Figura 1) apresenta uma análise relacionando fatores limitantes presentes no Brasil, exigências na legislação e as capacidades da tecnologia *blockchain* passíveis de possibilitarem soluções e adequações e a (Figura 2) uma análise SWOT sobre a aplicação da tecnologia *blockchain* para projetos de sistemas de logística reversa de resíduos eletrônicos.

Dado os resultados, é possível afirmar que a aplicação da tecnologia *blockchain* na coleta e reciclagem de resíduos eletrônicos pode trazer diversos benefícios e inovações para a cadeia de valor, desde os fabricantes, passando por consumidores, até os centros de reciclagem, viabilizando soluções de rastreabilidade, confiabilidade, eficiência, inclusão social e sustentabilidade.

Todavia, é importante considerar os desafios e as limitações da tecnologia, como a carência de mão de obra especializada e riscos de grande impacto relacionados à segurança cibernética. Junto a isso, é importante considerar que, para que propostas sejam bem-sucedidas, conscientização e interesse conjunto dos diversos agentes envolvidos é fundamental.

Esse trabalho não busca esgotar o tema e apresenta algumas limitações. Toda análise baseada em literatura é influenciada por vieses dos realizadores e da amostra de literatura selecionada. Além disso, esse trabalho não aborda questões técnicas para o desenvolvimento e implementação de tecnologias de razão distribuída, as quais desafios e restritivos a depender das ferramentas adotadas e questões relacionadas à segurança cibernética na aplicação dessa tecnologia não foram abordadas.

Por fim, dado os resultados e lacunas encontradas por esse trabalho, estudos futuros podem abordar a aplicação da tecnologia *blockchain* sob o contexto técnico, meios de capacitação de mão-de-obra, formas de engajamento de organizações para reconhecerem os potenciais dessa tecnologia, validação e práticas para segurança da informação em redes *blockchain* e métodos para criação de ambientes regulatórios baseados nessa tecnologia.



7. Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

REFERÊNCIAS

ABDELBASIR, S. M. et al. Status of electronic waste recycling techniques: a review. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 25, n. 17, p. 16533–16547, jun. 2018.

ALEXANDRIS, G. et al. **Blockchains as Enablers for Auditing Cooperative Circular Economy Networks**. 2018 IEEE 23rd International Workshop on Computer Aided Modeling and Design of Communication Links and Networks (CAMAD). **Anais...** Em: 2018 IEEE 23RD INTERNATIONAL WORKSHOP ON COMPUTER AIDED MODELING AND DESIGN OF COMMUNICATION LINKS AND NETWORKS (CAMAD). Barcelona: IEEE, set. 2018. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/8514985/>>. Acesso em: 11 dez. 2023

ALVES, R. et al. An Action Research Study for Elaborating and Implementing an Electronic Waste Collection Program in Brazil. **Systemic Practice and Action Research**, v. 34, n. 1, p. 91–108, fev. 2021.

ANAND, P.; CHAUHAN, A. The advent of ownerless businesses: Decentralised autonomous organisations. **International Journal of Scientific and Technology Research**, v. 9, n. 2, p. 2848–2852, fev. 2020.

BONILLA, S. H. **Transformação digital e Indústria 4.0: Produção e sociedade**. São Paulo, SP, Brasil: Editora Edgard Blucher, 2023.

BRASIL, R. F. DO. **Lei Nº 12.305 - Política Nacional de Resíduos Sólidos**. , 2 ago. 2010. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm>. Acesso em: 3 dez. 2023

BRASIL, R. F. DO. **Decreto nº 10.240**. , 12 fev. 2020. Disponível em: <<https://www2.camara.leg.br/legin/fed/decret/2020/decreto-10240-12-fevereiro-2020-789763-norma-pe.html>>. Acesso em: 4 dez. 2023

BUTERIN, V. Ethereum: A Next-Generation Smart Contract and Decentralized Application Platform. 2014.

DAMADI, H.; NAMJOO, M. Smart Waste Management Using Blockchain. **IT Professional**, v. 23, n. 4, p. 81–87, 1 jul. 2021.

DASAKLIS, T. K.; CASINO, F.; PATSAKIS, C. **A traceability and auditing framework for electronic equipment reverse logistics based on blockchain: the case of mobile phones**. 2020 11th International Conference on Information, Intelligence, Systems and Applications (IISA). **Anais...** Em: 2020 11TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON INFORMATION, INTELLIGENCE, SYSTEMS AND APPLICATIONS (IISA). Piraeus, Greece: IEEE, 15 jul. 2020. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/9284394/>>. Acesso em: 23 nov. 2023



DE OLIVEIRA NETO, G. C.; DE JESUS CARDOSO CORREIA, A.; SCHROEDER, A. M. Economic and environmental assessment of recycling and reuse of electronic waste: Multiple case studies in Brazil and Switzerland. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 127, p. 42–55, dez. 2017.

DIAS, P. et al. Waste electric and electronic equipment (WEEE) management: A study on the Brazilian recycling routes. **Journal of Cleaner Production**, v. 174, p. 7–16, fev. 2018.

DOS SANTOS, L. A. et al. **E- Waste collection in the reverse logistics systems and case study in Rio de Janeiro, RJ, Brazil**. 2021 2nd Sustainable Cities Latin America Conference (SCLA). **Anais...** Em: 2021 2ND SUSTAINABLE CITIES LATIN AMERICA CONFERENCE (SCLA). Medellin, Colombia: IEEE, 25 ago. 2021. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/9540092/>>. Acesso em: 30 nov. 2023

DUA, A. et al. **Blockchain-based E-waste Management in 5G Smart Communities**. IEEE INFOCOM 2020 - IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS). **Anais...** Em: IEEE INFOCOM 2020 - IEEE CONFERENCE ON COMPUTER COMMUNICATIONS WORKSHOPS (INFOCOM WKSHPS). Toronto, ON, Canada: IEEE, jul. 2020. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/9162845/>>. Acesso em: 23 nov. 2023

DWIVEDI, V. et al. A Formal Specification Smart-Contract Language for Legally Binding Decentralized Autonomous Organizations. **IEEE Access**, v. 9, p. 76069–76082, 2021.

Electronic waste (e-waste). Disponível em: <[https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/electronic-waste-\(e-waste\)](https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/electronic-waste-(e-waste))>. Acesso em: 10 dez. 2023.

ELLINGER, E. W. et al. Decentralized Autonomous Organization (DAO): The case of MakerDAO. **Journal of Information Technology Teaching Cases**, 13 jun. 2023.

FAQIR-RHAZOU, Y.; ARROYO, J.; HASSAN, S. A comparative analysis of the platforms for decentralized autonomous organizations in the Ethereum blockchain. **Journal of Internet Services and Applications**, v. 12, n. 1, p. 9, dez. 2021.

FRANÇA, A. S. L. et al. Proposing the use of blockchain to improve the solid waste management in small municipalities. **Journal of Cleaner Production**, v. 244, p. 118529, jan. 2020.

GHOSH, S. K. et al. Waste electrical and electronic equipment management and Basel Convention compliance in Brazil, Russia, India, China and South Africa (BRICS) nations. **Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy**, v. 34, n. 8, p. 693–707, ago. 2016.

GOVINDAN, K. et al. Analysing green supply chain management practices in Brazil's electrical/electronics industry using interpretive structural modelling. **International Journal of Environmental Studies**, v. 70, n. 4, p. 477–493, ago. 2013.

GUPTA, N.; BEDI, P. **E-waste Management Using Blockchain based Smart Contracts**. 2018 International



Conference on Advances in Computing, Communications and Informatics (ICACCI). **Anais...** Em: 2018 INTERNATIONAL CONFERENCE ON ADVANCES IN COMPUTING, COMMUNICATIONS AND INFORMATICS (ICACCI). Bangalore: IEEE, set. 2018. Disponível em:
 <<https://ieeexplore.ieee.org/document/8554912/>>. Acesso em: 2 nov. 2023

GUZZO, D. et al. Analysis of national policies for Circular Economy transitions: Modelling and simulating the Brazilian industrial agreement for electrical and electronic equipment. **Waste Management**, v. 138, p. 59–74, fev. 2022.

HOLGATE, P. **How do we tackle the fastest growing waste stream on the planet?** Disponível em:
 <<https://www.weforum.org/agenda/2018/02/how-do-we-tackle-the-fastest-growing-waste-stream-on-the-planet/>>. Acesso em: 15 dez. 2023.

HOOVER, M. **Top five blockchain benefits transforming your industry.** **IBM Blog**, 22 fev. 2018. Disponível em: <<https://www.ibm.com/blog/top-five-blockchain-benefits-transforming-your-industry/www.ibm.com/blog/top-five-blockchain-benefits-transforming-your-industry/>>. Acesso em: 11 dez. 2023

JOSHI, S.; SHARMA, M.; BARVE, A. Implementation challenges of blockchain technology in closed-loop supply chain: A Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE) management perspective in developing countries. **Supply Chain Forum: An International Journal**, v. 24, n. 1, p. 59–80, 2 jan. 2023.

KUTSYK, P.; REDCHENKO, K.; VORONKO, R. Management Control and Modern Decentralized Technologies. **Baltic Journal of Economic Studies**, v. 6, n. 4, p. 98–102, 24 nov. 2020.

MOUGAYAR, W. **Blockchain para os negócios: promessa, prática e aplicação da nova tecnologia da internet**. 1st. ed. Rio de Janeiro, RJ, Brasil: Alta Books, 2017.

NAKAMOTO, S. Bitcoin: A Peer-to-Peer Electronic Cash System. 2008.

NEEDHIDASAN, S.; SAMUEL, M.; CHIDAMBARAM, R. Electronic waste – an emerging threat to the environment of urban India. **Journal of Environmental Health Science and Engineering**, v. 12, n. 1, p. 36, dez. 2014.

NETO, J. F. DE O.; SILVA, M. M.; SANTOS, S. M. A Mini-Review of E-Waste Management in Brazil: Perspectives and Challenges. **CLEAN – Soil, Air, Water**, v. 47, n. 9, p. 1900152, set. 2019.

OECD. **E-waste generated per capita | Society Indicators**. Disponível em:
 <<https://goingdigital.oecd.org/en/indicator/53>>. Acesso em: 4 abr. 2024.

PACHECO, M. N. J. De la tecnología blockchain a la economía del token. **Derecho PUCP**, n. 83, p. 61–87, 2019.



PAES, C. E. et al. Management of Waste Electrical and Electronic Equipment in Brazilian Public Education Institutions: Implementation Through Action Research on a University Campus. **Systemic Practice and Action Research**, v. 30, n. 4, p. 377–393, 12 ago. 2016.

PARLIAMENT, T. E. **DIRECTIVE 2012/19/EU OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 4 July 2012 on waste electrical and electronic equipment (WEEE)**. Official Journal of the European Union, , 4 jul. 2012. Disponível em: <<http://data.europa.eu/eli/dir/2012/19/oj/eng>>. Acesso em: 10 dez. 2023

PETRONI, B. C. A. et al. Smart contracts applied to a functional architecture for storage and maintenance of digital chain of custody using blockchain. **Forensic Science International: Digital Investigation**, v. 34, p. 300985, set. 2020.

RENAULT, V. **Section 14. SWOT Analysis: Strengths, Weaknesses, Opportunities, and Threats**. Disponível em: <<https://ctb.ku.edu/en/table-of-contents/assessment/assessing-community-needs-and-resources/swot-analysis/main>>. Acesso em: 4 abr. 2024.

SAHOO, S.; HALDER, R. Blockchain-Based Forward and Reverse Supply Chains for E-waste Management. Em: DANG, T. K. et al. (Eds.). **Future Data and Security Engineering**. Cham: Springer International Publishing, 2020. v. 12466p. 201–220.

SHAHABUDDIN, M. et al. A review of the recent development, challenges, and opportunities of electronic waste (e-waste). **International Journal of Environmental Science and Technology**, v. 20, n. 4, p. 4513–4520, abr. 2023.

SOUZA, R. G. DE et al. Sustainability assessment and prioritisation of e-waste management options in Brazil. **Waste Management**, v. 57, p. 46–56, nov. 2016.

WANG, S. et al. Decentralized Autonomous Organizations: Concept, Model, and Applications. **IEEE Transactions on Computational Social Systems**, v. 6, n. 5, p. 870–878, out. 2019.

WOF, W. E. F. **A New Circular Vision for Electronics - Time for a Global Reboot**. [s.l.] Platform for accelerating the circular economy, jan. 2019. Disponível em: <http://www3.weforum.org/docs/WEF_A_New_Circular_Vision_for_Electronics.pdf>. Acesso em: 10 dez. 2023.

APÊNCIDE C – ARTIGO III

Decentralized Autonomous Organization for Circular Economy: A proof of concept in the e-waste recycling process

Thomaz Henrique Viaro Bridi. ^a

thomaz.bridi@aluno.unip.br

Mayara Neves Pohlmann ^a

Mayara.pohlmann@gmail.com

Benedito Cristiano Petroni ^a

cristianopetroni@gmail.com

Cecília Maria Villas Boas de Almeida ^a

cecilia.almeida@docente.unip.br

Rodrigo Franco Gonçalves ^{a*}

rodrigo.goncalves@docente.unip.br

a. Universidade Paulista, Rua Dr. Bacelar 1212, São Paulo, Brazil

** Corresponding author*

Decentralized Autonomous Organization for Circular Economy: A proof of concept in the e-waste recycling process

Abstract

Circular economy business models many times requires some desired features as network governance, stakeholders empowerment, and regulation and transparency to government and society. In this paper, we discuss the feasibility of Decentralized Autonomous Organization (DAO) based in blockchain to achieve this features in the particular context of electronic waste recycling circle. We conduct a proof-of-concept (PoC) of a DAO, codified in smart contracts, to evaluate the technological feasibility and some operational characteristics of Ethereum blockchain network. The results shown that some features as traceability, process automation, roles and rules definition, and token-based payments and credits are viable and has the potential to achieve the desired features to create innovative circular business models, although the specific case limitation of the PoC. The results also shown that transactions costs of the public Ethereum network can turn economically unviable small-scale recycling business models or low-value-added waste other than e-waste.

Keywords: Blockchain, Electronic waste, Ethereum, Recycling, Smart contract, Solid waste

1. Introduction

Circular Economy (CE) is pointed out as a way to treat waste generation, transitioning from a linear economy to a circular model (Halog and Anieke, 2021), and a way to promote economic efficiency. In this sense, many countries adopt policies and/or regulations for a circular economy, including taxation rules and government funding and incentives (Assmann et al., 2023). Wasserbaur et al. (2022) considerer that a successful transition to a circular economy should occur both from government policies – a top-down perspective – as from the business models (BM) constitution by innovators, in a bottom-up perspective.

A top-down view of CE sees the government as a regulator and promoter (Hartley et al., 2023). Conversely, the business model perspective of CE is bottom-up, creating value at the micro-level (Lüdeke-Freund et al., 2019). Cramer (2022) argues that successful top-down CE initiatives require bottom-up efforts from industry, startups, and communities, facilitated through stakeholder

collaboration and network governance. The idea of network governance allied with circular business models (CBM) is the starting point of our research. In this sense, two principles of network governance for CE presented by Cramer (2022) are considered: 1) New circular business models should benefit all network partners. 2) Transparent division of labor among the relevant actors is indispensable.

Korhonen (2020) associates the concept of self-organization to network governance, considering CE systems as a kind of complex adaptive system consisting of physical flows of materials and energy and the actors, organizations, and communities interacting with them; in this type of context, self-organization is a common characteristic. According to Braz and Mello (2022), the self-organization property is pointed out as an emerging property of CE network management.

In the context of Municipal Solid Waste Management (MSWM), Fidelis et al. (2023) point the importance of the empowerment of stakeholders, in particular those in vulnerable social conditions, like scavengers, and general socio-production inclusion. The problem of vulnerable social conditions and low-income people involved with MSWM is also pointed out by França et al. (2020). Ziegler et al. (2023) discuss the relations between CE and cooperatives, point out the emergency of alternative conceptions of the economy and the inclusion of the more marginalized or invisible stakeholders, and detach the importance of democratic and participatory governance, autonomy and independence, and rules for the distribution of profit.

In this sense, we can establish the high-level context of our research problem: the bottom-up perspective of CBM, which involves network governance with self-organization and rule definition; stakeholders' empowerment, with the inclusion of the most vulnerable and fair distribution of labor and profit; cooperation, innovation, and free initiative from industry, startups, cooperatives, and the community to define the circular business models (CBM). This context shall coexist with the top-down perspective of governance, with regulations and taxes, so transparency is necessary. The Figure 1 shows the pillars of our research.

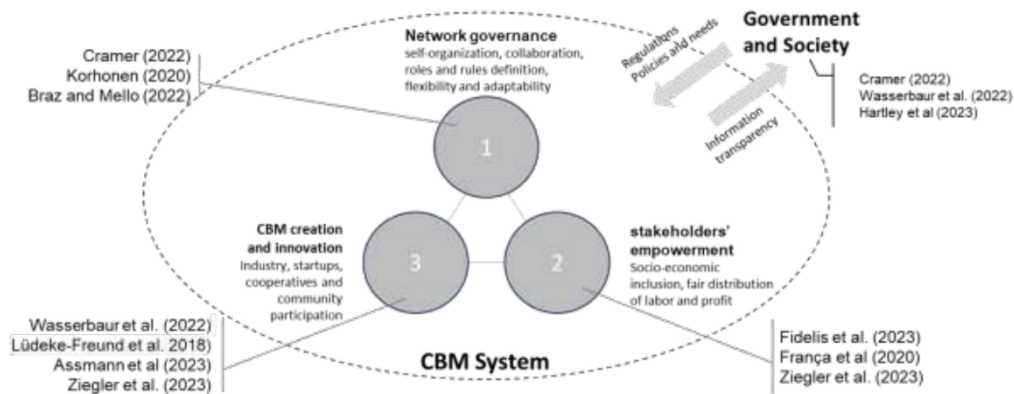


Figure 1. Theoretical pillars of the present research context and its supported literature: Expected features of a CBM.

By other hand, with the rising of Bitcoin and other crypto-currencies, many innovations rising due its basic technology: the Blockchain as, for example, Decentralized Finance (DeFi). Unlike traditional finance, controlled by governments, DeFi operates without a central authority, through network governance. In the same way as DeFi, the concept of a decentralized autonomous organization (DAO) emerges, powered by blockchain technology. A DAO can be understood as a set of people or organizations interacting with each other, aligned around common goals, and responsible for managing and maintaining the organization. The business logic, agreements, and consensus between those involved are based on rules specified in open-source smart contracts (Anand and Chauhan, 2020; Schirmacher et al., 2021). Organizations of this nature can enable network governance through a decentralized consensus mechanism (Lin et al., 2023), which also allows for more democratic and transparent governance without the need for a central decision-making agent (Anand and Chauhan, 2020).

In a broad sense, the research question (RQ) is:

RQ: Can a DAO offer the expected features for the creation of circular business models in accordance with the research pillars presented in Figure 1?

As a scope limitation, our research considers only the recycle circle of the CE, applied to electrical and electronic waste. That choice is due to:

1. Its economic relevance worldwide (Nithya et al., 2021; Shittu et al., 2021);

2. The intrinsic value of e-waste by mass unit, its complexity of materials, components, and disassembling, and its environmental impact and risks, including hazardous materials (Abdelbasir et al., 2018; Omondi et al., 2022);
3. The stakeholders have well-defined roles in the recycling process (Liu et al., 2022).

The objective of this paper is: 1) to discuss the possibility of a DAO to achieve the expected features of circular business models, in accordance with the research pillars; 2) to evaluate the technological feasibility of utilizing a DAO structure based on the Ethereum blockchain network to implement an experimental case of an e-waste recycling process.

As research method, we implement an experimental DAO structure under Ethereum blockchain, with smart contracts to define the information structure of stakeholders and business rules, as a proof-of-concept (PoC).

This paper is organized as follows: The Background section presents the fundamentals of the applied technologies and DAO concepts, as well as a review of related works. The Method section presents the two parts of the research method: the former describes the experimental business case of a hypothetical e-waste recycling process, and the latter describes the proof-of-concept (PoC) of the technological solution. The Results present the software artifacts that compose the DAO PoC and its implementation aspects. The Discussion evaluates the DAO applicability related to CBM from both theoretical and practical results.

2. Background

2.1 Blockchain and Smart Contracts

A blockchain network is a distributed ledger database maintained independently by each member across a vast network, without a central authority to distribute records. Each node keeps a copy of the ledger independently updating and ensuring consistency (Panwar and Bhatnagar, 2020). Blockchain uses cryptography for security, generating hash codes for each transaction (PETRONI et al. 2020). As noted by Mougayar (2017), the hash code (symbol #) serves as a unique digital fingerprint, verifying the integrity of information without direct analysis.

Blockchain technology allows transactions to be permanently recorded in a manner that cannot be erased later; updates are made sequentially, maintaining a continuous and indelible historical trail and assuring traceability (Mougayar, 2017; Petroni et al. 2020).

Originally designed for storing cryptocurrency transactions, blockchain can also store contracts. A contract is a document that formalizes an agreement between parties to acquire, protect, transfer, modify, preserve, or extinguish rights and assets. Digital contracts face challenges in ensuring immutability and controlling changes, which blockchain can address (Petroni et al., 2020).

Contracts on a blockchain network are called **Smart Contracts**, which are computer programs running on a blockchain with self-verifying, self-executing, and tamper-resistant properties, enabling business rules and automations (Mohanta et al., 2018). They are created and executed via programming code that defines business rules and entities, such as a customer registration or sales operations, often using the Solidity language. According to Andoni et al., (2019), smart contracts can enable new business solutions.

As pointed out by Rouhani et al. (2018), a blockchain network can be:

- a) Public: initially permissionless, as seen in Bitcoin's model, where nodes are untrusted. Users with anonymous identities can join, input transactions, and participate in the consensus process.
- b) Private: Similar to public blockchain, but with an additional membership layer to authenticate and authorize users, who may have different levels of access to send, read transactions, or participate in consensus.

Beyond Bitcoin's platform, various blockchain platforms have emerged, with Ethereum (Buterin, 2014) being one of the most prominent. Ethereum features a native cryptocurrency called Ether (ETH) and can be used to build end-to-end systems for unexplored business models (Saraf and Sabadra, 2018). However, operating on Ethereum incurs a cost, known as a "gas fee," paid in *gwei* (1 *gwei* = 10^{-9} ETH, required for both developing and executing smart contracts (Koutmos, 2023).

To the aim of this research, some characteristics of smart contract can be pointed:

- a) Intrinsic network organization of the blockchain;
- b) Historical record with transparency, consistence and legal value;
- c) Data storage of business rules, business entities and business transactions
- d) Intrinsic payment or credits system (blockchain primary function)
- e) Open platform to new business model creation

2.2 Decentralized Autonomous Organization

DAOs are blockchain-native organizations with collective ownership, managed by members via smart contracts (Bellavitis et al., 2023). These self-executing contracts operate based on predefined business rules, eliminating the need for third-party oversight or central control (Wang et al., 2019; Anand and Chauhan, 2020). Singh and Kim (2019) highlight that DAOs offer greater transparency through automated rule agreements defined in code without human intervention. As a technological structure, a DAO utilizes smart contracts executed automatically on the blockchain network, which encode the rules and the decision-making process, creating a structure with decentralized control (Wright, 2023).

According to Altaieb and Zoltan (2022), a DAO is fully democratized through a voting system, on which the members can propose, vote, and promulgate changes to the rules. The automation of the voting system can implement the results without the presence of a coordinator or third party. The offered services are managed automatically and decentralized, with transparency and full public activity.

To Saurabh et al. (2023), a DAO leverages its blockchain network's functionalities to establish innovative business models for creating, delivering, and capturing value. By redefining organizational management, DAOs have applications in contexts requiring collaboration, trust, and transparency (Anand and Chauhan, 2020). However, despite their potential, significant limitations and challenges remain, including improved data authentication, ensuring network interoperability, and broader adoption of the technologies involved (Baralla et al., 2023; Shojaei et al., 2021).

Figure 2 illustrates a DAO's structure compared to traditional organizations. Traditional organizations have a hierarchical structure where participants use information systems, like ERP, with an operational front-end and hard-coded business rules and entities (users, clients, products, sales, etc.) stored in a centralized database. In contrast, a DAO operates on a non-hierarchical, peer-to-peer network. Its front-end includes decision-making through voting, contracts and agreements, payment and credit systems using DAO tokens (or primary blockchain tokens like Ether), and transparent access to historical data and metrics..

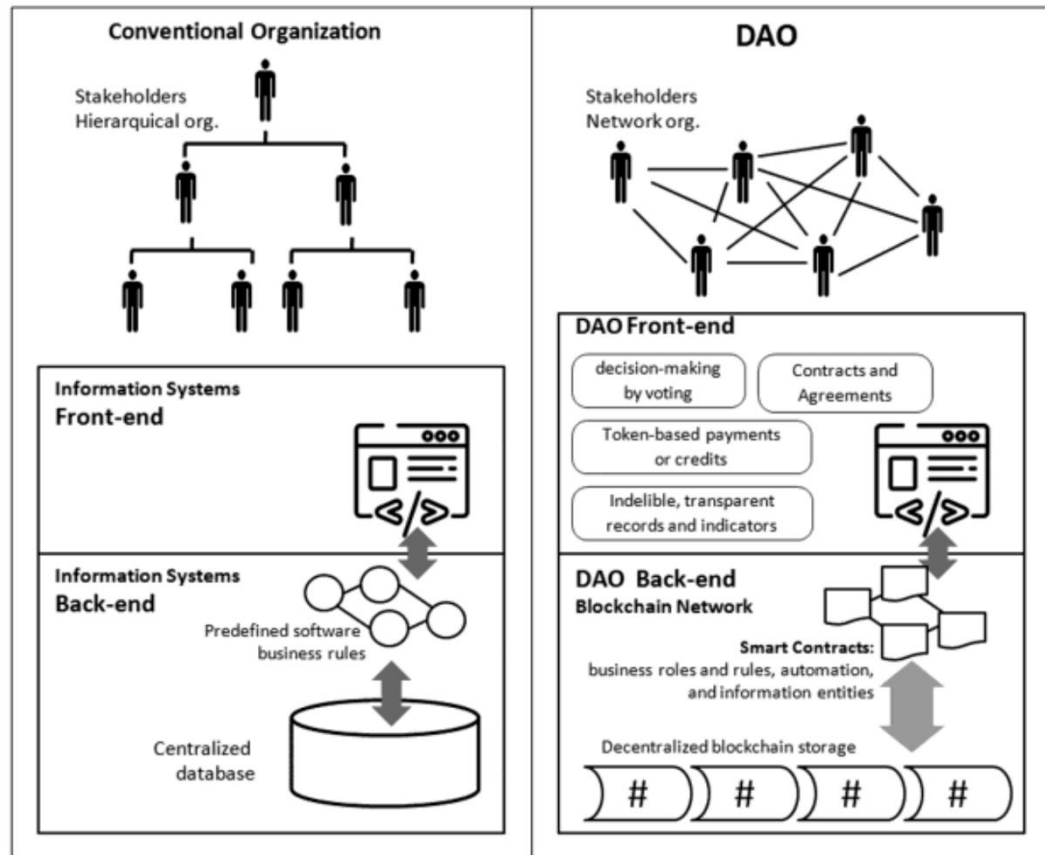


Figure 2. Comparison of a DAO and a conventional organizations and respective systems.

2.3 Related works

A search¹ relating DAO with a broad term in CE context returns zero results at Web of Science and only one article at Scopus. Although a zero return is not, *per se*, evidence of novelty, if the sets of terms have no sense to be intersected, our research intent is to show that join DAO and CE make sense and it is a novelty in scholar literature.

Shrivastava et al. (2019) uniquely link DAO and waste management in Scopus, proposing an automated system using blockchain and IoT to detect waste in garbage cans and communicate with collection trucks. The proposal involves an agreement between the consumer and the network

¹ Search string: "decentralized autonomous organization" AND ("circular economy" OR "waste management" OR "recycl*" OR "reverse logistic*")

via smart contracts, but the agreement's specifics are not detailed. Although the paper mentions DAOs, it does not explore their characteristics. Although the concept of DAO has been little explored by scholars, there are many papers relating other blockchain application and technology to CE and related terms. Carlos et al. (2024) evaluate the strategic potential of digital technologies to enhance CE, detaching three: the Internet of Things, big data, and blockchain. Blockchain is also pointed out by Sánchez-García et al. (2024) as an enabling technology for CE to ensure transparency and traceability.

Blockchain technology can help promote a more sustainable and socially responsible economy. By decentralizing processes, reducing costs, and improving security, blockchain can contribute to the circular economy, where resources are reused and waste is minimized (Upadhyay et al., 2021).

Wu et al. (2018) propose the use of blockchain to establish a credit exchange system in the circular economy, with a model and PoC of the system. However, the study does not clearly explain the fundamentals applied in the context of the circular economy.

In general, blockchain applications have shown promise for logistics optimization and management (Feng et al., 2019). As such, a blockchain network can enable organizations by facilitating transactions between agents (Buterin, 2014) as well as allowing the transparency of reliable data for the agents involved (Alexandris et al., 2018).

In e-waste management, Poongodi et al. (2020) propose using blockchain and 5G technology to ensure transparency, traceability, and integrity throughout the product's life cycle to the recycling center. They mention promoting proper disposal but do not detail the method. Gupta and Bedi (2018) suggest a blockchain system for tracking e-waste and incentivizing proper disposal through smart contract rules and penalties. Both articles involve the same stakeholders and life cycle: producer, retailer, consumer, collection center, and recycling center. Sahoo (2020) presents a system for e-waste management based on blockchain capable of covering the entire product life cycle, from manufacturing to recycling. Damadi (2021) covers the topic of intelligent waste management, using a combination of edge computing and blockchain to create an environment where waste management companies have access to incentive mechanisms.

França et al. (2020) propose using blockchain to create a social cryptocurrency to compensate solid waste collectors in a small Brazilian municipality. While this approach offers social, environmental, and public health benefits, it remains centralized, with control by the municipality in a top-down structure. Additionally, it lacks traceability for the waste, which is recovered for recycling by weight.

3. Method

Our research method involves implementing an experimental DAO in two parts: First, we describe a business case for e-waste recycling, with limited features and stakeholders representing the real recycling process.

Second, we present a proof-of-concept (PoC) software application that demonstrates the DAO's technological feasibility, including features, stakeholder actions, data, and smart contract structures.

E-waste, with its complex component structure, materials, disassembly process, and environmental impact (especially heavy metals), suggests that the data structure could also apply to other waste types.

3.1. Experimental business case

The experimental business case involving well-defined roles, representing the different process stakeholders; a recycling process with its respective activities; the e-waste characterization; all these elements have an informational structure. The business case CE process is represented in Figure 3. The process stakeholders are based on Liu et al. (2022), França et al.(2020), and Fidelis et al.(2023):

- a) Consumer discards end-of-use electric or electronic equipment, i.e., the e-waste generator.
- b) Collector collects the e-waste and takes it to the recycling unit.
- c) Manufacturer is responsible for informing the product structure of components and materials (the product tree) that generates e-waste at the end of its life.
- d) Recyclers receive the e-waste, disassemble, separate components, and recycle materials. It can be a recycling cooperative, for example.
- e) Observer represents a governmental and/or social stakeholder concerned with process transparency and policy compliance.

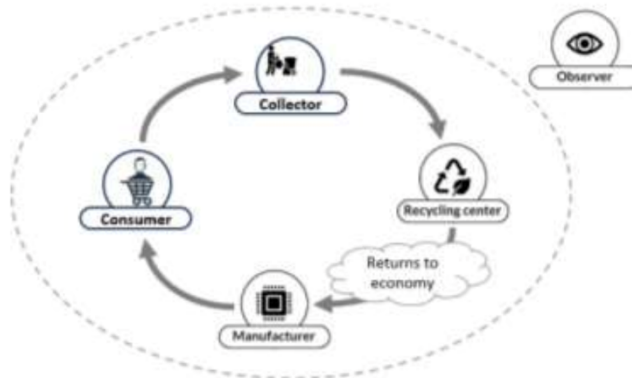


Figure 3. Business Case CE process

The business case process activities and business rules are described below. The circular process of managing electrical or electronic waste is done by:

1. Manufacturer: Provides information about the product's components and materials, including disassembly instructions and warnings about hazardous substances.
2. Consumer: Disposes of the product at the end of its useful life.
3. Collector: Ensures that the waste is delivered to a recycling center.
4. Recycler: Disassembles the product, extracts recyclable materials, and sells them to manufacturers, closing the circle.

According to Liu et al. (2022), there may be different players in these operations, specialized in specific components or material extraction and commercialization.

The business case rules require the Recycler to report the list and quantity of extracted materials, matching the product tree's material list provided by the Manufacturer (same material ID and quantity). These rules ensure that recovered materials are reintegrated into the economy rather than ending up in landfills. Consistent recycled materials can meet top-down regulations, provide indelible records for Observers, and qualify for environmental credits. The business case requires some critical information management aspects, pointed out by Dua et al. (2020): information transparency of collection channels, waste traceability, waste disposal, and recovery with recognized and proven accounting. Dua et al. (2020) and Shahabuddin et al. (2023) add that incentive methods for disposal are often inefficient due to accounting difficulties and a lack of transparency in the conventional methods adopted.

The Recycler is also responsible for assigning credits to the stakeholders: for the Manufacturer, crediting him for fulfilling the end-of-life of his product through the traceability of the product ID; for the Consumer, crediting him for sustainable consumption practices; and for the Collector, crediting him for the job. In this case, the credit to the Collector can be in the form of a cryptocurrency, as proposed by França et al. (2020), since it is an intrinsic functionality of a DAO.

All transactions must be publicly visible and recorded on the blockchain, especially those related to legal or tax matters like credits to manufacturers or collectors. These records need to be permanent and compliant with government regulations. By the end, our business case considers e-waste. E-waste is technological equipment that has reached the end of its functional life cycle, is obsolete, or is damaged beyond repair (WHO, 2023). The management of e-waste implies significant sustainability challenges, highlighting the need for effective disposal practices to mitigate environmental, economic, and social impacts (Dasaklis et al., 2020; Needhidasan et al., 2014; Sahoo and Halder, 2020).

We adopted a simple e-waste information structure composed only by *products* and its related *materials*. However, a more complex information structure could be defined using a hierarchical and multi-level structure, based on ISO 10303, also known as the Standard for the Exchange of Product Model Data (STEP) and data storage in Extensible Markup Language (XML).

3.2. The DAO Proof-of-Concept

The proof-of-concept (PoC) utilizes an arrangement of software applications to implement and test the Smart Contracts structure that composes some core elements of the DAO that are present in the business case.

The blockchain protocol selected was Ethereum, given its widespread use and maturity in terms of storage capacity and distributed computing. The smart contracts with the necessary functionalities were developed using the Remix IDE tool, version 0.38.1, written in the Solidity programming language, the main language supported by the Ethereum blockchain networks, adopting version 0.8.19 of the compiler.

Table 1 summarizes the functionality of the six smart contracts, and Fig. 4 shows more details of the contracts, such as defined types (structs), state variables, events, and functions.

Table1.Smart contracts developed.

Smart contracts	Features
Products	Stores and controls records of registered electronic products.
Stakeholders	Stores and controls the records of organizations and people registered on the network.
Credits	Stores and controls the balance of stakeholder credits.
Disposal	Stores and controls disposal records and the quantities of each product disposed of.
Materials	Stores and controls the composition records of registered products.
DAO-PoC	Carries out the scripted proof-of-concept procedure and stores data on the steps taken.

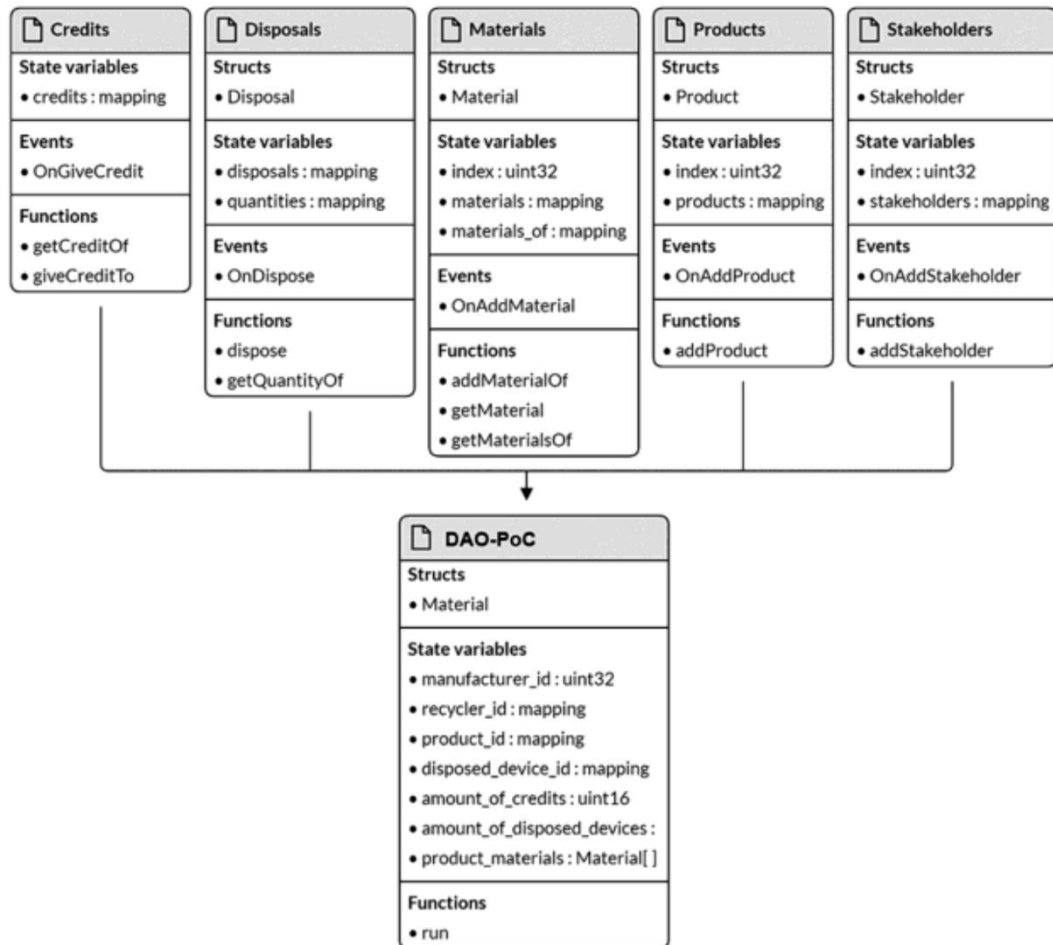


Figure 4. Smart contract structure, representing the involved business entities. The DAO-PoC is a meta-entity, i.e., it has no real-world significance; it is used only as an operational interface.

The script for the simulation procedure used as a validation method is executed using the "run" function in the "DAO-PoC" smart contract. Figure 5 describes the stages of the validation routine and shows a sequence diagram of this procedure. To represent it, we use the UML sequence diagram, which is an international standard for software development (Booch et al., 2005). Highlights include steps 1 to 6, which emit traceable events that can be processed by external systems and other testing tools outside the blockchain ecosystem.

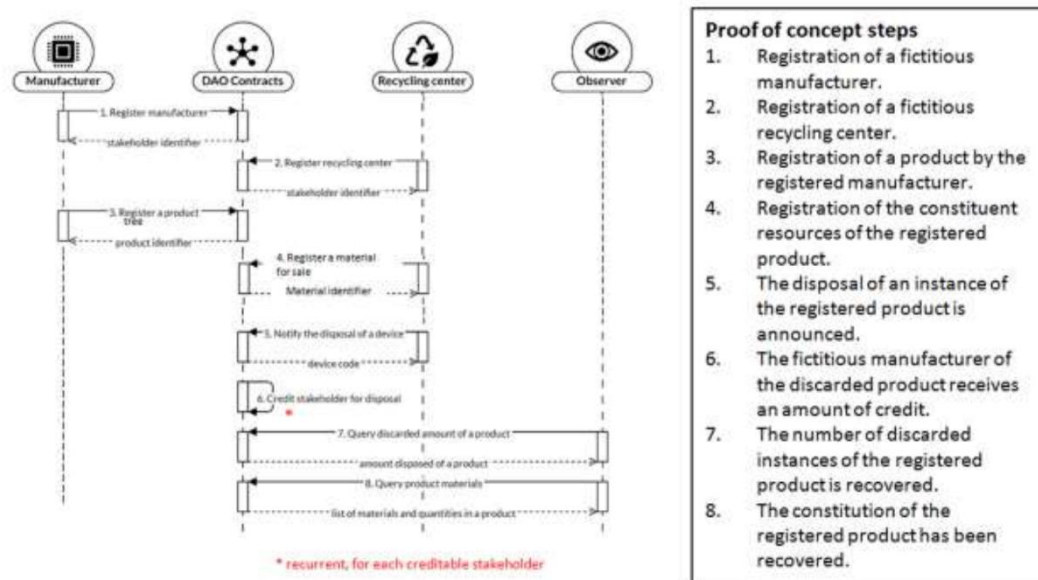


Figure 5. Proof-ofConcept flow diagram.

4. Proof of concept results

The results show the execution of the main program *DAO-PoC*, which sequentially calls the functionalities present in the subordinate contracts, as shown in the sequence diagram in Fig. 5. After executing the run function contained in the *DAO-PoC* contract, the check of the data registered and stored in the smart contracts is shown in Figure 6. Some values from the material data structure are presented: toxicity, name, weight. The results shown the traceability property, linking the disposed device with the correspondent manufacturer, recovered material and the recycler.

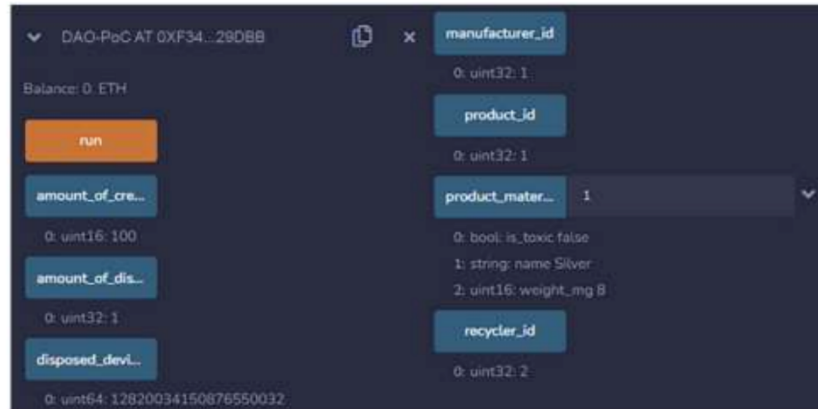


Figure 6. Print of the interface of the Remix IDE tool used for coding, compiling, publishing and executing the functionalities present in smart contracts. The values stored in smart contracts are the values in white color.

Table 2 lists the costs for publishing new contracts and the costs for each step of the experiment. "Gas unit" is the name for the unit of measurement used for transaction costs on Ethereum. It has nothing to do with fuel gas.

Table 2. Computational cost for publishing smart contracts and computational cost for processing each stage of the experiment on the private Ethereum network. used in the experiment. Considering a gas price of 57 gwei and an ETH/USD conversion factor of 3536.40.March 4, 2024 prices.

Smart contract	Cost (Ethereum gas	
Publishing cost	units)	cost(USD\$)
Credits	246,056 gas	49.60
Disposals	349,810 gas	70.51
Materials	800,935 gas	161.44
Products	536,832 gas	108.21
Stakeholders	524,214 gas	105.67
Operation processing cost	Cost (Ethereum gas	cost(USD\$)
	units)	
Add manufacturer	98,703 gas	19.90
Add recycler	98,751 gas	19.91

Register product	100,152	20.19
Register product composition	144,199	29.07
Records the disposal of a product	71,078	14.33
Offer of incentive credits	46,239	9.32
Gets the number of discarded units of a product	0	0.00
Gets the list of materials for a discarded product	0	0.00

5. Discussion

The schema of our results discussion is shown in Figure 7. Considering the bottom-up perspective of CBM, represented in the pillars of our research: 1) Network governance; 2) stakeholders' empowerment; 3) CBM creation and innovation; also, attendance at top-down regulations and flow of information to government and society. It is possible to evaluate the following:

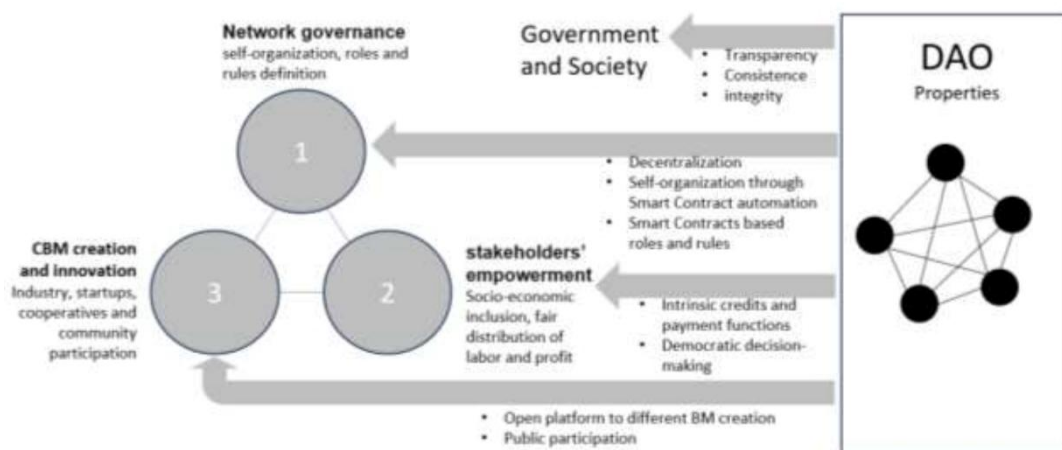


Figure 7. DAO properties to achieve CBM expected features defined in Fig.1

Our results indicate that a DAO supports network governance through its inherent decentralization and self-organization via smart contract automation. This is consistent with the literature (Anand and Chauhan, 2020; Bellavitis et al., 2023; Singh and Kim, 2019; Wang et al., 2019) and our PoC's Run function. Additionally, our PoC defined roles and rules, some of which align with those presented by Poongodi et al. (2020) and Gupta and Bedi (2018), all codified in Smart Contracts. Stakeholder empowerment is a DAO feature where all participants can vote on roles or agreements and establish payment or credit systems, as noted by França et al. (2020). This theoretically benefits vulnerable stakeholders like scavengers. While our PoC includes a credit system, these effects cannot be confirmed without real-world application with actual participants. The literature discusses circular business models based on blockchain, as outlined in Section 2.3, but none explore DAOs. Our research is unique in this regard. While creating a full circular business model is beyond our PoC's scope, some technical features were implemented in the business case. Our findings highlight DAO characteristics of information transparency, consistency, and integrity, with potential legal value, as noted by Petroni et al. (2020). This supports compliance with government policies, regulations, and societal expectations for environmental practices. The PoC demonstrated the recording of all transactions within the private blockchain's experimental setup. On a practical level, the functionalities of the DAO structure tested in the PoC showed:

- a) The feasibility of quantifying material that can be recovered corroborated by stakeholders and with transparency for observers, attesting to compliance with regulations, or generating credits. The established business rule and information structure of the product make it possible to match the material recovered by the recycler with the material described by the manufacturer. This can be an enabler for greater collaboration between stakeholders, as pointed out by Dua (2020), democratization of waste management, and reverse logistics, given the decentralized capacity that a DAO can possess, as pointed out by Anand and Chauhan (2020) and Lin et al.(2023).
- b) The automatic execution of smart contracts in the decentralized structure assures traceability in the interactions between actors, as product with its manufacturer or disposal with recycler. It can facilitate commercial interactions, and, as pointed out by Anand and Chauhan (2020).
- c) The feasibility of generating credit for players with transparency and integrity of transactions using tokens from the Ethereum network, opens up possibility to support social currency systems, extending the solution proposed by França et al.(2020) or the generation and exchange of fungible credits, as proposed by Wu et al.(2018).

One practical result refers to the estimated transaction cost on the public blockchain network due to the gas tax. This result contradicts that stated by Upadhyay et al.(2021) for blockchain application. The circular process of managing electrical or electronic waste is done by:s in EC. Another consequence is the possibility of “gas cost” making small-scale recycling business models or low-value-added waste other than e-waste economically unviable.

We also observed a technical limitation related to the immutability of smart contracts. Once they have been published on the network, the software architecture, error corrections, or updating requirements become more complex than with traditional information systems or databases.

6. Conclusions

Considering the general research question: can a DAO offer the operational and informational structure for the creation of circular business models in accordance with the research pillars presented in Fig. 1? Our research indicates that blockchain features can support circular business models, and since a DAO is blockchain-based, it can utilize these features. Additionally, a DAO offers decentralization, network governance, and stakeholder empowerment. The PoC demonstrates that, within its scope and experimental limits, features such as transparent waste disposal and material recovery records, self-organization via smart contracts, and credit systems are technically viable.

The paper objectives were achieved since we can trace the DAO properties to the expected CBM characteristics, as shown in Fig. 7, either through theoretical correspondence with the literature or through the experimental results of the PoC. In this sense, the main contribution of this research is to show the potential of a DAO for bottom-up circular business models and with regard to top-down regulations and policies.

Perhaps because our research focused only on the e-waste recycling process, we did not find anything that would prevent its application to other types of waste, as long as they could be identifiable with a unique ID, with some reservations regarding the blockchain transaction costs.

Limitations of this research include the PoC being conducted under experimental conditions with simulated stakeholder actions, so real stakeholder perceptions and behaviors cannot be assessed. While our proposal is unique for DAOs in the CE context, the blockchain literature reviewed was not exhaustive, limiting comparisons of our proposal’s functionalities with others. In future studies, we propose the construction of a DAO prototype for a real CBM to evaluate the stakeholder’s actions and social and business interactions.

Funding

This work was supported by the by National Council for Scientific and Technological Development [grant numbers 305310/2021-6] and in part by Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brazil (CAPES) – Finance Code 001

Statments

During the preparation of this work the authors used Google Gemini in order to improve English language and text summarization. After using this tool/service, the author(s) reviewed and edited the content as needed and take(s) full responsibility for the content of the publication

References

- Abdelbasir, S. M., Hassan, S. S. M., Kamel, A. H., El-Nasr, R. S. (2018). Status of electronic waste recycling techniques: A review. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(17), 16533–16547. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-2136-6>
- Alexandris, G., Katos, V., Alexaki, S., & Hatzivasilis, G. (2018). Blockchains as Enablers for Auditing Cooperative Circular Economy Networks. *2018 IEEE 23rd International Workshop on Computer Aided Modeling and Design of Communication Links and Networks (CAMAD)*, 1–7. <https://doi.org/10.1109/CAMAD.2018.8514985>
- Altaleb, H., Zoltan, R. (2022). Decentralized autonomous organizations review, importance, and applications. *2022 IEEE 26th International Conference on Intelligent Engineering Systems (INES)*, 000121–000126. <https://doi.org/10.1109/INES56734.2022.9922656>
- Anand, P., & Chauhan, A. (2020). The advent of ownerless businesses: Decentralised autonomous organisations. *International Journal of Scientific and Technology Research*, 9(2), 2848–2852.
- Andoni, M., Robu, V., Flynn, D., Abram, S., Geach, D., Jenkins, D., McCallum, P., & Peacock, A. (2019). Blockchain technology in the energy sector: A systematic review of challenges and opportunities. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 100, 143–174. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.10.014>
- Assmann, I. R., Rosati, F., & Morioka, S. N. (2023). Determinants of circular business model adoption—A systematic literature review. *Business Strategy and the Environment*, 32(8), 6008–6028. <https://doi.org/10.1002/bse.3470>

- Baralla, G., Pinna, A., Tonelli, R., & Marchesi, M. (2023). Waste management: A comprehensive state of the art about the rise of blockchain technology. *Computers in Industry*, 145, 103812. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2022.103812>
- Bellavitis, C., Fisch, C., & Momtaz, P. P. (2023). The rise of decentralized autonomous organizations (DAOs): A first empirical glimpse. *Venture Capital*, 25(2), 187–203. <https://doi.org/10.1080/13691066.2022.2116797>
- Booch, G., Rumbaugh, J., & Jacobson, I. (2005). *The unified modeling language user guide* (2nd ed.). Addison-Wesley Professional.
- Braz, A. C., & Mello, A. M. de. (2022). Circular economy supply network management: A complex adaptive system. *International Journal of Production Economics*, 243, 108317. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2021.108317>
- Buterin, V. (2014). *Ethereum: A Next-Generation Smart Contract and Decentralized Application Platform*. https://ethereum.org/669c9e2e2027310b6b3cdce6e1c52962/Ethereum_Whitepaper_-_Buterin_2014.pdf
- Carlos, R. L., De Souza, E. B., & Mattos, C. A. (2024). Enhancing circular economy practices through the adoption of digital technologies. *Business Strategy & Development*, 7(1), e330. <https://doi.org/10.1002/bsd2.330>
- Cramer, J. (2022). Effective governance of circular economies: An international comparison. *Journal of Cleaner Production*, 343, 130874. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130874>
- Damadi, H., & Namjoo, M. (2021). Smart Waste Management Using Blockchain. *IT Professional*, 23(4), 81–87. <https://doi.org/10.1109/MITP.2021.3067710>
- Dasaklis, T. K., Casino, F., & Patsakis, C. (2020). A traceability and auditing framework for electronic equipment reverse logistics based on blockchain: The case of mobile phones. *2020 11th International Conference on Information, Intelligence, Systems and Applications (IISA)*, 1–7. <https://doi.org/10.1109/IISA50023.2020.9284394>
- Dua, A., Dutta, A., Zaman, N., & Kumar, N. (2020). Blockchain-based E-waste Management in 5G Smart Communities. *IEEE INFOCOM 2020 - IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS)*, 195–200. <https://doi.org/10.1109/INFOCOMWKSHPS50562.2020.9162845>
- Feng, Q., He, D., Zeadally, S., Khan, M. K., & Kumar, N. (2019). A survey on privacy protection in blockchain system. *Journal of Network and Computer Applications*, 126, 45–58. <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2018.10.020>

- Fidelis, R., Guerreiro, E. D. R., Horst, D. J., Ramos, G. M., De Oliveira, B. R., & De Andrade Junior, P. P. (2023). Municipal solid waste management with recyclable potential in developing countries: Current scenario and future perspectives. *Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy*, 41(9), 1399–1419. <https://doi.org/10.1177/0734242X231160084>
- França, A. S. L., Amato Neto, J., Gonçalves, R. F., & Almeida, C. M. V. B. (2020). Proposing the use of blockchain to improve the solid waste management in small municipalities. *Journal of Cleaner Production*, 244, 118529. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118529>
- Gupta, N., & Bedi, P. (2018). E-waste Management Using Blockchain based Smart Contracts. 2018 *International Conference on Advances in Computing, Communications and Informatics (ICACCI)*, 915–921. <https://doi.org/10.1109/ICACCI.2018.8554912>
- Halog, A., & Anieke, S. (2021). A Review of Circular Economy Studies in Developed Countries and Its Potential Adoption in Developing Countries. *Circular Economy and Sustainability*, 1(1), 209–230. <https://doi.org/10.1007/s43615-021-00017-0>
- Hartley, K., Schülzchen, S., Bakker, C. A., & Kirchherr, J. (2023). A policy framework for the circular economy: Lessons from the EU. *Journal of Cleaner Production*, 412, 137–176. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137176>
- Korhonen, J. (2020). The circular economy as a complex adaptive system. In M. Brandão, D. Lazarevic, & G. Finnveden (Eds.), *Handbook of the Circular Economy* (pp. 28–38). Edward Elgar Publishing. <https://doi.org/10.4337/9781788972727.00010>
- Koutmos, D. (2023). Network Activity and Ethereum Gas Prices. *Journal of Risk and Financial Management*, 16(10), 431. <https://doi.org/10.3390/jrfm16100431>
- Lin, Y., Hu, W., Chen, X., Li, S., & Wang, F.-Y. (2023). City 5.0: Towards Spatial Symbiotic Intelligence via DAOs and Parallel Systems. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, 8(7), 3767–3770. <https://doi.org/10.1109/TIV.2023.3298903>
- Liu, T., Zhang, Q., Zheng, Z., Wu, S., & Weng, Z. (2022). Stakeholder Analysis of the Waste Electrical and Electronic Equipment Internet Recycling Industry. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(16), 10003. <https://doi.org/10.3390/ijerph191610003>
- Lüdeke-Freund, F., Gold, S., & Bocken, N. M. P. (2019). A Review and Typology of Circular Economy Business Model Patterns. *Journal of Industrial Ecology*, 23(1), 36–61. <https://doi.org/10.1111/jiec.12763>
- Mohanta, B. K., Panda, S. S., & Jena, D. (2018). An Overview of Smart Contract and Use Cases in Blockchain Technology. 2018 *9th International Conference on Computing, Communication*

- and Networking Technologies (ICCCNT)*, 1–4.
<https://doi.org/10.1109/ICCCNT.2018.8494045>
- Mougayar, W. (2017). *Blockchain para os negócios: Promessa, prática e aplicação da nova tecnologia da internet* (1st ed.). Alta Books.
- Needhidasan, S., Samuel, M., & Chidambaram, R. (2014). Electronic waste – an emerging threat to the environment of urban India. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 12(1), 36. <https://doi.org/10.1186/2052-336X-12-36>
- Nithya, R., Sivasankari, C., & Thirunavukkarasu, A. (2021). Electronic waste generation, regulation and metal recovery: A review. *Environmental Chemistry Letters*, 19(2), 1347–1368.
<https://doi.org/10.1007/s10311-020-01111-9>
- Omondi, E. A., Ndiba, P. K., & Koech, G. C. (2022). Complexity of E-Waste and its Management Challenges in Developing Countries – A Review. *International Journal of Environmental Sciences & Natural Resources*, 31(2). <https://doi.org/10.19080/IJESNR.2022.31.556309>
- Panwar, A., & Bhatnagar, V. (2020). Distributed Ledger Technology (DLT): The Beginning of a Technological Revolution for Blockchain. *2nd International Conference on Data, Engineering and Applications (IDEA)*, 1–5.
<https://doi.org/10.1109/IDEA49133.2020.9170699>
- Petroni, B. C. A., Gonçalves, R. F., Sérgio De Arruda Ignácio, P., Reis, J. Z., & Dolce Uzum Martins, G. J. (2020). Smart contracts applied to a functional architecture for storage and maintenance of digital chain of custody using blockchain. *Forensic Science International: Digital Investigation*, 34, 300985. <https://doi.org/10.1016/j.fsidi.2020.300985>
- Poongodi, M., Hamdi, M., Vijayakumar, V., Rawal, B. S., & Maode, M. (2020). An Effective Electronic waste management solution based on Blockchain Smart Contract in 5G Communities. *2020 IEEE 3rd 5G World Forum (5GWF)*, 1–6.
<https://doi.org/10.1109/5GWF49715.2020.9221346>
- Rouhani, S., Pourheidari, V., & Deters, R. (2018). Physical Access Control Management System Based on Permissioned Blockchain. *2018 IEEE International Conference on Internet of Things (iThings) and IEEE Green Computing and Communications (GreenCom) and IEEE Cyber, Physical and Social Computing (CPSCom) and IEEE Smart Data (SmartData)*, 1078–1083. https://doi.org/10.1109/Cybermatics_2018.2018.00198
- Sahoo, S., & Halder, R. (2020). Blockchain-Based Forward and Reverse Supply Chains for E-waste Management. In T. K. Dang, J. Küng, M. Takizawa, & T. M. Chung (Eds.), *Future Data and Security Engineering* (Vol. 12466, pp. 201–220). Springer International Publishing.
https://link.springer.com/10.1007/978-3-030-63924-2_12

- Sánchez-García, E., Martínez-Falcó, J., Marco-Lajara, B., & Manresa-Marhuenda, E. (2024). Revolutionizing the circular economy through new technologies: A new era of sustainable progress. *Environmental Technology & Innovation*, 33, 103509. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2023.103509>
- Saraf, C., & Sabadra, S. (2018). Blockchain platforms: A compendium. *2018 IEEE International Conference on Innovative Research and Development (ICIRD)*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/ICIRD.2018.8376323>
- Saurabh, K., Rani, N., & Upadhyay, P. (2023). Towards blockchain led decentralized autonomous organization (DAO) business model innovations. *Benchmarking: An International Journal*, 30(2), 475–502. <https://doi.org/10.1108/BIJ-10-2021-0606>
- Schirmacher, N., Jensen, J., & Avital, M. (2021, December 14). *Token-Centric Work Practices in Fluid Organizations: The Cases of Yearn and MakerDAO*. Forty-Second International Conference on Information Systems, Austin, USA. https://www.researchgate.net/profile/Nina-Schirmacher/publication/356490357_Token-Centric_Work_Practices_in_Fluid_Organizations_The_Cases_of_Yearn_and_MakerDAO/links/619da071d7d1af224b2010ec/Token-Centric-Work-Practices-in-Fluid-Organizations-The-Cases-of-Yearn-and-MakerDAO.pdf
- Shahabuddin, M., Uddin, M. N., Chowdhury, J. I., Ahmed, S. F., Uddin, M. N., Mofijur, M., & Uddin, M. A. (2023). A review of the recent development, challenges, and opportunities of electronic waste (e-waste). *International Journal of Environmental Science and Technology*, 20(4), 4513–4520. <https://doi.org/10.1007/s13762-022-04274-w>
- Shittu, O. S., Williams, I. D., & Shaw, P. J. (2021). Global E-waste management: Can WEEE make a difference? A review of e-waste trends, legislation, contemporary issues and future challenges. *Waste Management*, 120, 549–563. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.10.016>
- Shojaei, A., Ketabi, R., Razkenari, M., Hakim, H., & Wang, J. (2021). Enabling a circular economy in the built environment sector through blockchain technology. *Journal of Cleaner Production*, 294, 126352. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126352>
- Shrivastava, S., Tripathi, A., Yamini, R. (2019). Blockchain-based smart waste management system. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*. 8 (11), 1030 - 1034 <https://doi.org/10.35940/ijitee.K1212.09811S19>

- Singh, M., & Kim, S. (2019). Blockchain technology for decentralized autonomous organizations. In *Advances in Computers* (Vol. 115, pp. 115–140). Elsevier.
<https://doi.org/10.1016/bs.adcom.2019.06.001>
- Upadhyay, A., Mukhuty, S., Kumar, V., & Kazancoglu, Y. (2021). Blockchain technology and the circular economy: Implications for sustainability and social responsibility. *Journal of Cleaner Production*, 293, 126130. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126130>
- Wang, S., Ding, W., Li, J., Yuan, Y., Ouyang, L., & Wang, F.-Y. (2019). Decentralized Autonomous Organizations: Concept, Model, and Applications. *IEEE Transactions on Computational Social Systems*, 6(5), 870–878. <https://doi.org/10.1109/TCSS.2019.2938190>
- Wasserbaur, R., Sakao, T., & Milios, L. (2022). Interactions of governmental policies and business models for a circular economy: A systematic literature review. *Journal of Cleaner Production*, 337, 130329. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.130329>
- Wright, S. A. (2023). DAOs & ADSs. *2023 IEEE 15th International Symposium on Autonomous Decentralized System (ISADS)*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/ISADS56919.2023.10091973>
- Wu, H.-T., Su, Y.-J., & Hu, W.-C. (2018). A Study on Blockchain-Based Circular Economy Credit Rating System. In S.-L. Peng, S.-J. Wang, V. E. Balas, & M. Zhao (Eds.), *Security with Intelligent Computing and Big-data Services* (Vol. 733, pp. 339–343). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-76451-1_32
- Ziegler, R., Poirier, C., Lacasse, M., & Murray, E. (2023). Circular Economy and Cooperatives—An Exploratory Survey. *Sustainability*, 15(3), 2530. <https://doi.org/10.3390/su15032530>

APÊNDICE D – REGISTRO DE SOFTWARE



IPI
Assinado
Digitalmente

REPÚBLICA FEDERATIVA DO BRASIL
MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO, INDÚSTRIA, COMÉRCIO E SERVIÇOS
INSTITUTO NACIONAL DA PROPRIEDADE INDUSTRIAL
DIRETORIA DE PATENTES, PROGRAMAS DE COMPUTADOR E TOPOGRAFIAS DE CIRCUITOS

Certificado de Registro de Programa de Computador

Processo Nº: **BR512024003740-3**

O Instituto Nacional da Propriedade Industrial expede o presente certificado de registro de programa de computador, válido por 50 anos a partir de 1º de janeiro subsequente à data de 09/10/2024, em conformidade com o §2º, art. 2º da Lei 9.609, de 19 de Fevereiro de 1998.

Título: Sistema de Organização Autônoma Descentralizada para Economia Circular

Data de publicação: 09/10/2024

Data de criação: 01/06/2024

Titular(es): RODRIGO FRANCO GONÇALVES; THOMAZ HENRIQUE VIARO BRIDI

Autor(es): RODRIGO FRANCO GONÇALVES; ODUVALDO VENDRAMETTO; THOMAZ HENRIQUE VIARO BRIDI

Linguagem: HTML; OUTROS

Campo de aplicação: IN-01; IN-05; MA-01; MA-02; MA-04; SM-02

Tipo de programa: AP-01; DS-05; PD-03

Algoritmo hash: SHA-512

Resumo digital hash:
e632522769122695b1d8ad0558b5cfe505ae37b76bb885ced9e6672be2e9ab4c4418f966adf1e647cb381d09b7fa6272e3
dc29def36ab5dd61fafe12031cd950

Expedido em: 15/10/2024

Aprovado por:

Carlos Alexandre Fernandes Silva
Chefe da DIPTO