

Universidade de Brasília – UnB
Faculdade de Administração, Contabilidade, Economia e Gestão de Políticas Públicas
Departamento de Economia



CUSTOS E BENEFÍCIOS AMBIENTAIS DA BLOCKCHAIN

Autor: Victor Augusto Medeiros Jucá - 15/0150750

Orientador: Andrei Domingues Cechin

Brasília

2022

VICTOR AUGUSTO MEDEIROS JUCÁ

CUSTOS E BENEFÍCIOS AMBIENTAIS DA BLOCKCHAIN

Monografia apresentada como parte das exigências para obtenção do grau de Bacharel em Ciências Econômicas pela Universidade de Brasília. Orientador: Prof. Dr. Andei Domingues Cechin.

Brasília – DF

2023

Victor Augusto Medeiros Jucá

Custos e benefícios ambientais da blockchain

Professor Orientador: Dr. Andrei Domingues Cechin

Brasília-DF, 2023

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Andrei Domingues Cechin (Orientador)

Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade da Universidade de Brasília

Prof. Dr. Diego Pereira Lindoso

Centro de Desenvolvimento Sustentável da Universidade de Brasília

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a minha família e amigos, que me deram o suporte necessário para que eu pudesse estar aqui e me alavancaram nos momentos mais sombrios de minha vida. Sem eles esse trabalho não seria possível.

É devido um agradecimento especial também ao meu orientador Dr. Andrei Cechin, que não somente me orientou de forma excepcional, mas foi paciente e compreensivo comigo em todos os momentos que tive dificuldades e por isso sou eternamente grato.

Gostaria de agradecer de forma geral todos os professores do departamento de economia pelos quais passei e que de alguma forma me moldaram, espero que possa refletir o excelente ensino que tive e me tornar bom profissional.

Por último gostaria de agradecer os mistérios da existência, consciência e a interligação holística da natureza micro e macrocós mica, que em sua infinita sabedoria me proporcionou as ferramentas da vida pelas quais posso experimentar a existência em si e ponderar sobre os mais profundos cantos da minha mente.

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo analisar os benefícios e custos ambientais da tecnologia de *blockchain*. Para isso, foi feita uma revisão de artigos científicos sobre o assunto no período de 2015 até 2022. A literatura destaca o forte potencial da *blockchain* para melhorar a eficiência em cadeias de produtivas circulares. Suas características únicas de rastreabilidade, imutabilidade, transparência e descentralização garantem robustez e confiabilidade em sistemas de armazenamento de dados, o que, por sua vez, se torna vantajoso para a tomada de decisão em economias circulares. O desenvolvimento da tecnologia de *blockchain* como uma ferramenta para reduzir os impactos ambientais ainda está em sua etapa inicial, assim como a própria tecnologia. Há uma preocupação com as emissões de carbono geradas pela atividade e o lixo eletrônico gerado por ela. As soluções propostas pelos autores são diversas, mas, em geral, acredita-se que mudar o protocolo de validação de aplicações de *blockchain* e mudar a matriz elétrica usada, são as melhores maneiras de reduzir os danos ambientais.

Palavras-chave: Blockchain; Economia Circular; Emissão de Carbono; Cadeias Produtivas Reversas.

ABSTRACT

This work aims to analyze the environmental benefits and costs of blockchain technology. For this, a review of scientific articles on the subject was carried out in the period from 2015 to 2022. The literature highlights the strong potential of blockchain to improve efficiency in circular production chains. Its unique features of traceability, immutability, transparency and decentralization ensure robustness and reliability in data storage systems, which, in turn, becomes advantageous for decision-making in circular economies. The development of blockchain technology as a tool to reduce environmental impacts is still in its infancy, as is the technology itself. There is concern about the carbon emissions generated by the activity and the electronic waste generated by it. The solutions proposed by the authors are diverse, but, in general, it is believed that changing the blockchain applications validation protocol and changing the electrical matrix used are the best ways to reduce environmental damage.

Keywords: Blockchain; Circular Economy; Carbon Emission; Reverse Supply Chain.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Processo de adição de novos blocos com validação POW.....	26
Figura 2. Taxa Hash da Bitcoin ao decorrer dos anos.....	43
Figura 3. Distribuição das mineradoras no total da rede Bitcoin em abril de 2020.....	46

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Artigos utilizados que apresentam os danos causados e estimativas de impacto ambiental da <i>blockchain</i> e suas principais contribuições.....	12
Tabela 2. Artigos utilizados que apresentam vantagens da utilização de <i>blockchain</i> e suas principais contribuições.....	15
Tabela. 3 Temas abordados e artigos que tratam de cada tema.....	17
Tabela. 4 Principais características benéficas e danosas da <i>blockchain</i>	30
Tabela. 5 Indicadores utilizados.....	50

LISTA DE ACRÔNIMOS

POS.	<i>Proof-of-Stake</i>
POW.	<i>Proof-of-Work</i>
IOT.	<i>Internet-of-Things</i>
ASICS.	<i>Application-Specific Integrated Circuit</i>
C2C.	<i>Cradle-to-Cradle</i>
NFT.	<i>Non-Fungible-Tokens</i>
BFT.	<i>Byzantine Fault Tolerance</i>
ReSOLVE.	<i>Regenerate, Share, Optimize, Loop, Virtualize and Exchange</i>
BDA.	<i>Big Data Analysis</i>
LAD.	<i>Localization, Agility, and Digitalization</i>
SDG.	<i>Sustainable Development Goals</i>

SUMÁRIO

1- Introdução.....	10
2- Metodologia.....	11
3-Referencial teórico	18
3.1- Economia Circular e Ecológica.....	19
3.2- Blockchain.....	24
3.3- Implicações do <i>Blockchain</i> para o meio ambiente	28
4- Como a tecnologia Blockchain pode favorecer a economia circular	31
4.1- Soluções e desafios oferecidos pela tecnologia.....	31
4.2- Sua utilização na circularização de cadeias produtivas e logística reversa.....	35
5- Os problemas ambientais acarretados pelo atual uso da Blockchain	40
5.1- Funcionamento do Proof of Work.....	40
5.2- Como Proof of Work afeta negativamente o meio ambiente	41
5.3 Desafios da mudança de protocolo de validação	50
6- Conclusão	52
7- Bibliografia.....	54

1- Introdução

Os problemas referentes ao meio ambiente são uma pauta de extrema importância para economia global como um todo. Sempre que nos deparamos com o surgimento de uma nova tecnologia é importante averiguar seus riscos e contribuições para a conservação ambiental. No caso do surgimento e expansão recente do uso de *blockchain* não é diferente, devendo ele também ser avaliado de forma crítica quanto aos seus benefícios, custos sociais e ambientais, temas os quais esse trabalho procura se aprofundar.

A literatura presente sobre a interligação da *blockchain* e o meio ambiente tende a ser polarizada, enquanto alguns autores enaltecem a nova tecnologia pela suas diversas características úteis do ponto de vista organizacional e seu potencial benefício para o meio ambiente como ferramenta de digitalização na indústria 4.0 de cadeias produtivas circulares, assim como usos para fomentar comportamento sustentável, outros evidenciam o seu atual uso dentro dos mercados financeiros, que vem cada vez mais gerando gastos maiores de energia em criptoativos intensivos em carbono. Porém poucos trabalhos expõem ambos os lados da moeda e se atendem a fazer uma avaliação crítica dos reais benefícios e malefícios da tecnologia do ponto de vista ambiental.

Surge então a necessidade de explorar ambos os lados desse dilema, preocupação que esse trabalho tem como seu foco. A apresentação clara dos danos ambientais causados pela *blockchain* e suas possíveis soluções são de suma importância para que a tecnologia possa ser implementada de forma eficiente dentro das cadeias produtivas circulares, uma vez que essas não poderiam negligenciar o custo intensivo de energia da tecnologia na hora de construir uma estratégia ecológica. Para além do dilema dentro da economia circular o trabalho integra uma análise crítica à perspectiva da circularização da produção, tendo em contrapartida os pressupostos da economia ecológica, exemplificando os limites da circularização, mesmo com o aumento da eficiência provenientes da *blockchain* e demais tecnologias da indústria 4.0.

As principais contribuições desse trabalho então se dão na interligação entre os temas da *blockchain*, economia circular e danos ao meio ambiente. Se atentando a evidenciar a emissão de carbono gerada pela produção de criptoativos, assim como mostrar seus usos para melhora de eficiência em cadeias produtivas circulares. Oferece uma visão ampla do problema e explora diversas soluções propostas, as quais se

encontram não apenas no campo da utilização da tecnologia pela economia circular, mas também de modo geral para todas as suas aplicações.

Para isso a pesquisa é estruturada da seguinte maneira: Em primeira instancia apresenta-se a metodologia de pesquisa, sendo essa uma revisão de literatura dentro dos dois pontos polarizantes de discussão. Em seguida são postos os referenciais teóricos, os quais fundamentam o conhecimento para o melhor entendimento do tema. A seguir discute-se o resultado da análise dos textos, sendo esse separado em duas partes principais, discutindo-se primeiro os usos da *blockchain* dentro da economia circular e os desafios dessa implementação, na segunda parte é discutido como a implementação de *blockchain* no mercado financeiro vem se tornando uma preocupação para o meio ambiente. Por fim são dadas as conclusões finais do trabalho, levando em conta ambos os lados da discussão e suas soluções apresentadas.

2- Metodologia

Este trabalho adota como método uma revisão sistemática da literatura sobre a tecnologia *blockchain* e suas implicações ambientais. O trade off, entre os custos ecológicos associados à *blockchain* e seus benefícios para organização de cadeias de produção circulares, raramente é tratado dentro da literatura, que geralmente se concentra em um dos dois, sem explicitar os dilemas da implementação de *blockchain* dentro e fora do mercado financeiro. Por isso, é importante trazer em pauta o debate sobre o real peso da utilização desse tipo de tecnologia a favor da economia circular e seus reais desafios e custos ambientais.

Para isso, definiu-se palavras-chave dentro de ambos os campos explorados de modo a definir o objeto de estudo a ser analisado no projeto. Formulou-se a pergunta “Qual o impacto da tecnologia *blockchain* no meio ambiente?” as palavras-chave definidas para a busca então foram: *Blockchain*; *Carbon footprint*; *Carbon Emissions*; *Waste*; *Environmental Damage*; *Climate Damage*; *Bitcoin*; *Cryptocurrency*; *Proof-of-*

Work; *POW*; *Proof-of-Stake*; *POS*; *Hashrate*. Definidas as palavras chaves, então foi definido o período de relevância das publicações, como o fenômeno é relativamente novo e de fato só ganha tração no meio acadêmico recentemente o período escolhido foi de 2015 até 2022, esse recorte temporal se mostrou satisfatório, uma vez que os artigos de importância identificados abrangem os anos de 2017 até 2022, sendo concentrados principalmente nos anos de 2021 e 2019. A pesquisa então foi feita através da plataforma Google Acadêmico, devido a sua biblioteca abrangente e diversificada, que permite o retorno de trabalhos espalhados em diversas outras plataformas, assim como a possibilidade de pesquisar termos no texto inteiro ao em vez de apenas no título da publicação.

Em uma pesquisa preliminar, foram separados 200 trabalhos, a serem analisados, dos quais foram descartados trabalhos com pouca relevância, excluindo aqueles com menos de 10 citações. Dos trabalhos com 10 citações ou mais, foram obtidos 52 trabalhos, cujos títulos e resumos foram analisados, passando por critérios de relevância a pesquisa, sendo esses: tratar de estimativas da emissão de carbono gerada pela atividade; tratar de como o modo de validação afeta o dispêndio energético; levar em conta a distribuição geográfica das mineradoras e o tipo de energia sendo empregado na atividade mineradora. Além disso foram aplicados critérios de exclusão de textos, sendo esses: trabalhos que tratam de ramos específicos não alinhados ao foco da pesquisa, como saúde, agricultura ou ciência de dados e trabalhos que não tiveram sua publicação final. O resultado da seleção foram 11 trabalhos, aos quais foram adicionados mais 2 relevantes para a discussão do tema, pois foram citados pela maioria dos artigos.

Tabela. 1: Artigos utilizados que apresentam os danos causados e estimativas de impacto ambiental da *blockchain* e suas principais contribuições.

ARTIGO	ANO	AUTOR	CONTRIBUIÇÕES
Blockchain e a Revolução do Consenso sob Demanda	2018	GREVE, Fabíola, et al.	Introduz a ideia de blockchain, dando suas principais características e utilidades
A cost of production model for bitcoin	2015	HAYES, A.	Cria um modelo econômico para a decisão microeconômica de produção de bitcoin, avaliando os custos e receita da mineração

Policy assessments for the carbon emission flows and sustainability of Bitcoin blockchain operation in China.	2021	JIANG, S. et al.	Estima a emissão de carbono da atividade mineradora de bitcoin na china sob diferentes políticas de redução dos danos ambientais
Life Cycle Assessment of Bitcoin mining	2019	KÖHLER, S.; PIZZOL, M.	Aplica a metodologia de <i>Life cycle assessment</i> para estimar as emissões de carbono da bitcoin
Quantification of energy and carbon costs for mining cryptocurrencies.	2018	KRAUSE, M. J.; TOLAYMAT, T.	Calcula a intensidade carbono de mineração de diferentes criptoativos que utilizam POW
Implausible projections overestimate near-term Bitcoin CO2 emissions.	2019	MASANET, E. et al.	Critica a estimacão de emissão de carbono feitas por MORA et. al. propondo melhores métodos de estimacão e fazendo uma estimacão própria aplicando esses métodos
Bitcoin emissions alone could push global warming above 2°C	2018	MORA, C. et al.	Estima a emissão de carbono da Bitcoin, sendo um dos primeiros trabalhos a trazer atencão para o problema
Proof-of-work based blockchain technology and Anthropocene: An undermined situation?	2021	SCHINCKUS, C.	Discute o uso de blockchain para o meio ambiente enquanto os gastos de energia do POW são não negligenciáveis, trazendo à tona o dilema entre os usos
The carbon footprint of bitcoin	2019	STOLL, C.; KLAASSEN, L.; GALLERSDÖRFER, U.	Estima a emissão de carbono da mineração de bitcoin utilizando de estimativas de geolocalizacão e composicão da matriz energética
Decarbonizing Bitcoin: Law and policy choices for reducing the energy consumption of Blockchain technologies and digital currencies	2018	TRUBY, J.	Explora políticas para solucionar o problema das emissões de carbono ao mesmo tempo que se preocupa em não danificar um mercado crescente e o desenvolvimento da tecnologia
Blockchain, climate damage, and death: Policy interventions to reduce the carbon emissions, mortality, and net-zero implications of non-fungible tokens and Bitcoin.	2022	TRUBY, J. et al.	Explora a emissão de carbono causada pelo crescimento das NFT's, assim como da bitcoin, associando essas emissões a mortes futuras pelos impactos ambientais advindos da mesma

Renewable energy will not solve bitcoin's sustainability problem	2019	VRIES, A.	Explora como a troca de matriz energética não solucionaria o problema da bitcoin, por questões de sazonalidade das fontes renováveis e o limite em médio e curto prazo da mudança da matriz, também fala sobre o problema do lixo eletrônico causado pela atividade mineradora, que não melhoraria com a mudança da matriz elétrica
Bitcoin's growing e-waste problem	2021	VRIES, A.; STOLL, C.	Estima a quantidade de lixo eletrônico gerado pela atividade mineradora

Fonte: elaboração do autor.

Em uma segunda análise esse trabalho busca apresentar maneiras que a tecnologia *blockchain* possa ser implementada para ajudar no desenvolvimento de cadeias de produção mais eficientes do ponto de vista econômico e ecológico. Para isso, foi formulada a pergunta “Como a *blockchain* pode beneficiar o meio ambiente?”. As palavras-chave definidas para responder a essa pergunta foram: *Blockchain; Reverse Supply Chain; Circular Economy; Internet of Things; IOT; efficiency; Bio circular economy*. Novamente, o período de busca foi delimitado do ano de 2015 até 2022, e os resultados obtidos na pesquisa preliminar mostram que esse recorte é pertinente, de modo que os trabalhos recuperados estavam contidos entre os anos de 2017 até 2022.

Na pesquisa preliminar dos termos chave foram selecionados 200 trabalhos, dos quais foram descartadas publicações com menos de 10 citações. Esse critério resultou em uma amostra de 66 publicações, as quais foram avaliadas com base em seus títulos e resumos, foram descartados trabalhos em áreas específicas como trabalhos na área de saúde, mercado de tokens de energia e agricultura, dando-se foco a trabalhos que discutissem a aplicação da tecnologia nas cadeias produtivas e trabalhos que buscam categorizar suas demais utilizações, os critérios para inclusão dos trabalhos, por tanto foram: tratar da utilização de *blockchain* para a melhora de cadeias produtivas circulares; tratar da importância das tecnologias da indústria 4.0 na melhora de eficiência das cadeias produtivas; avaliar possíveis usos da tecnologia que se alinham com as metas ambientais e tratar da pavimentação do caminho para ampla adoção da economia circular utilizando-se da *blockchain*. Enquanto os critérios de exclusão foram:

trabalhos que tratam de áreas que não são o foco da pesquisa, como projetos na área de saúde, propostas de estruturas de incentivo com a utilização de criptoativos e fomentar mercados para externalidades; trabalhos que na data da pesquisa ainda não haviam sido devidamente publicados e trabalhos que focam em outras tecnologias da indústria 4.0 na circularização de cadeias produtivas, sem necessariamente citar a *blockchain*. Após a avaliação foram selecionados cerca de 10 artigos de importância para o tema explorado na pesquisa, sendo adicionados a esses mais 3 artigos devido a citações dos demais autores e relevância ao tema explorado.

Tabela. 2: Artigos utilizados que apresentam vantagens da utilização de *blockchain* e suas principais contribuições.

ARTIGO	ANO	AUTOR	CONTRIBUIÇÕES
Blockchain for the future of sustainable supply chain management in Industry 4.0	2020	ESMAEILIAN, B. et al.	Avalia as utilizações de diversas tecnologias da indústria 4.0 e <i>blockchain</i> para resolução de problemas ambientais sobre a perspectiva da economia circular
Blockchain technology for bridging trust, traceability and transparency in circular supply chain	2022	CENTOBELLI, P. et al.	Traça um paralelo entre os 3 R's das cadeias circulares e as 3 principais características da tecnologia <i>blockchain</i> . Propondo uma estrutura para implementação da tecnologia e avaliando como ela pode melhorar as cadeias produtivas reversas dentro de cada um dos 3 R's
Redesigning Supply Chains using Blockchain-Enabled Circular Economy and COVID-19 Experiences	2021	NANDI, S. et al.	Avalia sobre a perspectiva de LAD as falhas nas cadeias produtivas durante a pandemia e oferece um framework para melhora-las utilizando de <i>blockchain</i>
Analyzing the sustainability of 28 'Blockchain for Good' projects via affordances and constraints	2021	TOMLINSON, B. et al.	Avalia projetos de <i>blockchain for good</i> , separando-os de acordo com suas propostas para melhora social e ecológica. Também traz críticas pertinentes sobre a utilização da tecnologia de modo amplo e suas reais capacidades

How the combination of Circular Economy and Industry 4.0 can contribute towards achieving the Sustainable Development Goals	2021	DANTAS, T. E. T. et al.	Traça um paralelo entre os objetivos da SDG e as tecnologias da indústria 4.0, destacando onde e qual tecnologia teria vantagem para solucionar cada uma das metas, também ajuda no entendimento de como essas tecnologias se interligam na solução dos problemas
The Role of Digital Technologies in Operationalizing the Circular Economy Transition: A Systematic Literature Review	2021	CAGNO, E. et al.	Explora o papel das tecnologias da indústria 4.0 na transição para uma economia circular, mostrando como elas interagem na resolução dos desafios para a circularização das cadeias produtivas
Blockchain technology and the circular economy: Implications for sustainability and social responsibility	2021	UPADHYAY, A. et al.	Avalia os usos da <i>blockchain</i> para soluções de cadeias produtivas circulares, assim como seu uso para garantir escolha ética de produtos e fomentar comportamento sustentável
At the Nexus of Blockchain Technology, the Circular Economy, and Product Deletion	2019	KOUHIZADEH, M.; SARKIS, J.; ZHU, Q.	Explora como a utilização de <i>blockchain</i> pode ajudar na tomada de decisão de exclusão de portfólio de produtos, assim como essa decisão deve ser tratada dentro da economia circular, onde devido a interligação das cadeias produtivas a exclusão de um produto pode significar menos material para outra cadeia.
Blockchain for the Circular Economy: Analysis of the Research-Practice Gap	2021	BÖCKEL, A.; NUZUM, A.-K.; WEISSBROD, I.	Revisão de literatura sobre a área de intersecção entre <i>blockchain</i> e economia circular, levando em conta trabalhos empíricos e teóricos feitos na junção das duas áreas
Digitalizing the closing-of-the-loop for supply chains: A transportation and blockchain perspective.	2021	BEKRAR, A. et al	Explora a implementação do uso de <i>blockchain</i> no sistema de transporte de cadeias produtivas circulares, dando ênfase nas características da <i>blockchain</i> como meio de transparência e rastreabilidade de dados

The potentials of combining Blockchain technology and Internet of Things for digital reverse supply chain: A case study	2022	HROUGA, M.; SBIHI, A.; CHAVALLARD, M.	Trata da combinação específica entre duas tecnologias da indústria 4.0, <i>blockchain</i> e IOT para melhor performance das cadeias produtivas circulares, fazendo um estudo de caso da cadeia de reciclagem de amianto na França e propondo um modelo de funcionamento para elas, assim como avaliando as vantagens do modelo proposto
Tecnologia Blockchain: inovação em Pagamentos por Serviços Ambientais	2019	PAIVA SOBRINHO, R. et al.	Explora a utilização de criptoativos para fomentar comportamento ambiental
Blockchain without waste: Proof-of-stake	2018	SALEH, F.	Explora os problemas de consenso dentro do POS, mostrando que é possível chegar ao consenso dentro de cenários específicos. Explicitando o trade-off entre consenso e gasto de energia, ou entre o POW e o POS

Fonte: elaboração do autor.

Os artigos explorados podem ser divididos em quatro frentes amplas quanto ao assunto que tratam, alguns artigos apresentam uma intersecção dos temas, enquanto outros tratam de um tema específico e 3 dos artigos não se encaixam em nenhuma dos temas, mas foram inclusos para facilitar o entendimento do tema da tecnologia *blockchain*, como exposto na tabela 3.

Tabela. 3: Temas abordados e artigos que tratam de cada tema.

TEMA	QUANTIDADE	ARTIGOS
Interação entre Indústria 4.0 e tecnologia <i>blockchain</i>	7	Blockchain for the future of sustainable supply chain management in Industry 4.0; The Role of Digital Technologies in Operationalizing the Circular Economy Transition: A Systematic Literature Review; How the combination of Circular Economy and Industry 4.0 can contribute towards achieving the Sustainable Development Goals; At the Nexus of Blockchain Technology, the Circular Economy, and Product Deletion; Blockchain for the Circular Economy: Analysis of the Research-Practice Gap; Digitalizing the closing-of-the-loop for supply chains: A transportation and blockchain perspective.; The potentials of combining Blockchain technology and Internet of Things for digital reverse supply chain: A case study

Blockchain como facilitador da implementação de cadeias produtivas reversas	7	Blockchain technology for bridging trust, traceability and transparency in circular supply chain; Redesigning Supply Chains using Blockchain-Enabled Circular Economy and COVID-19 Experiences; Blockchain for the future of sustainable supply chain management in Industry 4.0; How the combination of Circular Economy and Industry 4.0 can contribute towards achieving the Sustainable Development Goals; The Role of Digital Technologies in Operationalizing the Circular Economy Transition: A Systematic Literature Review; Blockchain technology and the circular economy: Implications for sustainability and social responsibility; The potentials of combining Blockchain technology and Internet of Things for digital reverse supply chain: A case study
Estimativas de emissões de carbono e demais danos ambientais causados pela blockchain	10	Policy assessments for the carbon emission flows and sustainability of Bitcoin blockchain operation in China; Life Cycle Assessment of Bitcoin mining; Quantification of energy and carbon costs for mining cryptocurrencies; Implausible projections overestimate near-term Bitcoin CO2 emissions; Bitcoin emissions alone could push global warming above 2°C; The carbon footprint of bitcoin; Decarbonizing Bitcoin: Law and policy choices for reducing the energy consumption of Blockchain technologies and digital currencies; Blockchain, climate damage, and death: Policy interventions to reduce the carbon emissions, mortality, and net-zero implications of non-fungible tokens and Bitcoin; Renewable energy will not solve bitcoin's sustainability problem; Bitcoin's growing e-waste problem
Críticas ao protocolo de validação POW	5	Blockchain without waste: Proof-of-stake; Quantification of energy and carbon costs for mining cryptocurrencies; Proof-of-work based blockchain technology and Anthropocene: An undermined situation? Renewable energy will not solve bitcoin's sustainability problem; Bitcoin's growing e-waste problem
Artigos de apoio	4	Analyzing the sustainability of 28 'Blockchain for Good' projects via affordances and constraints; Tecnologia Blockchain: inovação em Pagamentos por Serviços Ambientais; Blockchain e a Revolução do Consenso sob Demanda; A cost of production model for bitcoin

Fonte: elaboração do autor.

3-Referencial teórico

A pesquisa tem três pilares. O primeiro o campo interdisciplinar da Economia Ecológica, trazendo conceitos como economia circular e *cradle-to-cradle*. O segundo é a discussão sobre os sistemas de validação e as características da *blockchain* como meio de registro. E o terceiro pilar é a avaliação dos custos e/ou benefícios ambientais da *blockchain*.

3.1- Economia Circular e Ecológica.

A ideia de um sistema econômico circular é abordada por Kenneth Boulding (1966) em seu trabalho “economics of the coming spaceship Earth” onde o autor discute as dificuldades de se transacionar para um sistema fechado, o que o mesmo define como um modo de organização onde a totalidade da produção é utilizada como matéria prima de outros processos dentro do próprio sistema “In a closed system, the outputs of all parts of the system are linked to the inputs of other parts.” (BOULDING, 1966, p. 2). A princípio, parece um conceito fácil de se entender, porém é difícil de se assimilar culturalmente, posto que sob um panorama histórico o ser humano sempre se viu como parte de um sistema aberto, “Primitive men, [...] imagined themselves to be living on a virtually illimitable plane” (BOULDING, 1966, p. 1) onde a existência de um novo horizonte era sempre possível, dessa maneira a cultura humana é moldada em cima da ideia de que sempre haverá novos espaços para a exploração e inclusão de *inputs* externos ao sistema.

No âmbito que o autor denomina de econosfera, o qual o mesmo define como sendo o total do estoque de capital de interesse para o sistema de permuta, vemos a exploração de recursos de maneira aparente. O total de capital em estoque é claramente um sistema aberto no sentido de ter *inputs* e *outputs*, sendo os *inputs* produção que soma ao estoque de capital e *outputs* sendo consumo que subtrai do estoque (BOULDING, 1966, p. 3, tradução nossa)¹. Por séculos recursos são extraídos, transformados em produtos, vendidos e eventualmente descartados em algum tipo de “cemitério” (MCDONOUGH W. et al, 2003, p. 27, tradução nossa)², portanto temos o *input* de materiais não econômicos que entram na esfera econômica por meio da produção e saem dela quando perdem seu valor econômico.

Na concepção de Boulding (1966), seria possível uma transição para um sistema fechado, ao menos no âmbito material que envolve a econosfera:

In regard to matter, therefore, a closed system is conceivable, that is, a ‘system in which there is neither increase nor decrease in material entropy. In such a system all

¹ No original: “This total stock of capital is clearly an open system in the sense that it has inputs and outputs, inputs being production which adds to the capital stock, outputs being consumption which subtracts from it.” (BOULDING, 1966, p. 3)

² No original: “Resources are extracted, shaped into products, sold, and eventually disposed of in a “grave”” (MCDONOUGH W. et al, 2003, p. 27)

outputs from consumption would constantly be recycled to become inputs for production (BOULDING, 1966, p. 5).

A ideia de um sistema econômico materialmente fechado é a base da economia circular, se opondo ao sistema atual de produção aberto e linear, que supõe contínua expansão da fronteira de exploração. Sem que de fato exista limite tangível à exploração de novos recursos, o que é definido por Boulding como sistema aberto, é para a economia circular seu contraponto a chamada economia linear. Do ponto de vista dos pesquisadores McDonough e Braungart (2002), criadores da ideia de *Cradle-to-Cradle* (C2C), a economia linear é a morte de recursos sendo altamente ineficiente em reaproveitar materiais que ficam décadas, as vezes séculos, descartados em aterros. Para os autores, a economia linear é definida como do berço ao túmulo. Portanto a economia circular faz oposição direta ao modo de produção atual, propondo em troca um modo de produção focado no reaproveitamento de recursos e a transição para um sistema econômico fechado.

Como referido acima, a economia circular recebe uma grande contribuição no início dos anos 2000 por parte do arquiteto William McDonough e o químico Michael Braungart que estabelecem o método de produção C2C “Simply put, C2C designs industrial systems to be commercially productive, socially beneficial, and ecologically intelligent” (MCDONOUGH W. et al, 2003, p. 435). Os dois propõem que o objetivo da produção verde não deve ser apenas reduzir os danos ao meio ambiente, mas criar designs de produtos e empresas que utilizem de materiais capazes de serem reincorporados na planta produtiva, de modo biológico ou tecnológico “While being eco-efficient may indeed reduce resource consumption and pollution in the short term, it does not address the deep design flaws of contemporary industry” (MCDONOUGH W. et al, 2003, p. 435). Com grande inspiração no funcionamento da natureza, o C2C parte de três ideias principais para o design: (1) de lixo como insumo, no sentido já explorado antes por Boulding (1966), onde todos os *outputs* devem ser *inputs* do próprio sistema; (2) do uso de energias renováveis e duráveis como fonte principal de combustível para a atividade humana; (3) do design interligado de empresas e adaptado ao sistema econômico local, celebrando a diversidade e complexidade dos sistemas.

Um modo de produção que busca, portanto, sua inspiração nos ecossistemas da natureza, o C2C procura propor princípios para a produção e design de novas indústrias, que espelhem o

sistema quase fechado que observamos no mundo natural. Por isso para o C2C é importante um sistema econômico complexo, interligado e diverso, que leva em conta as características únicas de cada localidade e cultura de consumo, e que maximize o reuso de materiais, assim como cadeias interligadas de decompositores naturais que garantem que haja virtualmente nenhum lixo, pois tudo é transformado em comida e volta a alimentar o sistema.

Porém, no âmbito energético até para a natureza é inviável a utilização de um ciclo fechado, é preferível a utilização da fonte mais duradoura possível, sendo essa o Sol. Boulding (1966) pondera o uso de energia nuclear, mas é relutante, pois tal forma de energia sofre do mesmo problema de abastecimento a longo prazo que a energia fóssil: “The development of nuclear energy has improved this picture, but has not fundamentally altered it, at least in present technologies, for fissionable material is still relatively scarce” (BOULDING, 1966, p. 6). Dentro da metodologia adota por McDonough e Braungart (2002) o problema energético é abordado de forma a favorecer formas de energia renováveis, principalmente a solar, visto que milhares de vezes mais do que quantidade de energia necessária para abastecer a atividade humana é irradiada sob a superfície do planeta todos os dias na forma de luz solar (MCDONOUGH W. et al, 2002, p. 32, tradução nossa)³.

O último princípio do C2C é em relação a junção holística e celebração da diversidade dos sistemas econômicos, propondo a adaptação local dos designs industriais para melhor acomodar as especificidades de cada lugar. A aplicabilidade do sistema de C2C de modo amplo pelo globo pavimenta então a estrutura da economia circular, onde os *outputs* de uma firma são utilizados por outra voltando para o sistema produtivo de forma indefinida, em oposição a lógica linear do sistema aberto que temos hoje. Tal sistema em ampla escala e interconectado necessita por tanto de um modo de organização dinâmico, confiável e amplamente acessível para os agentes, nesse quesito a *blockchain* se mostra uma alternativa atraente para resolução do problema.

Como contraponto as ideias de reciclagem perpétua dos recursos naturais apresentadas na economia circular, há uma visão do processo produtivo embasada na termodinâmica.

³ No original: “thousands of times the amount of energy needed to fuel human activities hits the surface of the planet every day in the form of sunlight.” (MCDONOUGH W. et al, 2002, p. 32)

Proposta por Georgescu Roegen (1906-1994) durante sua carreira acadêmica, essa visão do processo econômico tem com ponto focal da sua análise a segunda lei da termodinâmica, a Lei da Entropia, levando em conta os fluxos de recursos naturais que entram e saem da esfera tecno-econômica, assim como a energia que inevitavelmente é dissipada na produção de bens e serviços. Nessa perspectiva, que representa um dos fundamentos do campo interdisciplinar de Economia Ecológica (CECHIN, 2010; 2018), a produção na esfera tecno-econômica simplesmente não é possível sem fluxos de entrada vindos da biosfera e sem fluxos de saída de volta à biosfera. São três, portanto, os tipos de fluxo que devem ser analisados em um sistema econômico.: (i) fluxos primários, servindo como interface entre a biosfera e a esfera tecno-econômica (extração de fontes primárias, como minas de carvão e aquíferos), e tudo aquilo que sai da esfera tecno-econômica para a biosfera; (ii) fluxos secundários, derivados da exploração dos fluxos primários, sejam eles insumos ou produtos, produzidos e consumidos dentro da esfera tecno-econômica; (iii) fluxos terciários, que derivam da reciclagem dos fluxos secundários. (GIAMPIETRO, 2019, p. 151, tradução nossa)⁴

Na perspectiva da economia ecológica temos então dois principais sistemas e os fluxos de materiais se expressam em *inputs* e *outputs* entre esses sistemas, todos os outputs primários que vão da esfera tecno-econômica para a biosfera precisam passar pelos processos internos de recaptação da biosfera para que possam ser novamente utilizados, isso impõe um limite natural aos recursos que podem ser extraídos e postos na biosfera que é além da capacidade humana de intervenção, ditada portanto pela capacidade de fornecer e reutilizar recursos da própria natureza. “For example, a cow cannot produce 500 l of milk per day, a person cannot eat 200,000 kcal of food per day, and a healthy soil cannot restore 10 t of nitrogen per hectare per year.” (GIAMPIETRO, 2019, p. 148-149). Giampietro (2019), crítica a ideia de que exista um modelo completamente circular que mantenha crescimento econômico, como proposto pela economia circular, com base nas ideias exploradas pela economia ecológica. “The narratives of EU and bioeconomy [...] have a theoretical basis in neoclassic models that endorse a strategy of top down planning of technological fixes typical of the neoliberal ideology” (GIAMPIETRO, 2019, p. 154).

⁴ No original: “(i) primary flows - flows crossing the interface between the technosphere and biosphere as defined in Fig. 8 as That is, primary flows enter from the biosphere into the technosphere (extracted from primary sources, such as coalmines, aquifers) and exit from the technosphere into the biosphere (into primary sinks, such as the atmosphere, water table, dumpsites); (ii) secondary flows - flows derived from the exploitation of primary flow” (GIAMPIETRO, 2019, p. 151)

A economia ecológica, portanto, propõe que quando analisada de maneira metabólica a circularização da economia não pode apenas se atentar aos fluxos de materiais dentro da esfera tecno-econômica, mas deve também se atentar aos fluxos primários, que circulam entre uma esfera e outra, levando em conta o limite natural atribuído à biosfera. Existe ainda a ideia que até mesmo a reciclagem dentro dos fluxos terciários tem um limite, existindo espaço pra circularização dos fluxos dentro da esfera tecno-econômica, mas que isso apenas não seria o suficiente para resolver pressão crescente sobre a biosfera.

Internal recycling is important, but when analyzing the pressure on the environment exerted by the metabolic pattern of a social-ecological system, what really matters is the relation between the size of the primary flow required by the technosphere and the size of the primary sources and primary sinks made available by the biosphere. (GIAMPIETRO, 2019, p. 153).

O autor então propõe que a transição da lógica econômica linear para uma lógica circular podem fatidicamente levar a uma diminuição no crescimento econômico, expressa como uma diminuição no consumo e produção. Avanços na esfera tecno-econômica teriam que levar em conta sua contraparte na biosfera, respeitando os limites e tempo ditados pela natureza para que os ciclos de recaptção e produção dos recursos naturais sejam completos e visando uma produção econômica que se adapte a esses fluxos impostos pela biosfera. Dessa maneira atividades econômicas que respeitam a integridade dos ciclos naturais se tornam um fardo para a economia como um todo porque os rendimentos da exploração de recursos renováveis é muito lenta e muito dispersa se comparada com que é atingido em outros setores econômicos baseados no fluxo linear de exploração de recursos. (GIAMPIETRO, 2019, p. 153-154, tradução nossa)⁵.

Portanto, enquanto atrativa a ideia de uma economia circular, é preciso se atentar aos limites factíveis que tal sistema pode alcançar, assim como possíveis promessas de crescimento econômico que podem se tornar não realizáveis. Nesse quesito, a economia ecológica traz um debate importante para o tema, servindo de contraponto crítico a utopia de globalização do

⁵ No original: “Economic activities that respect the integrity of natural cycles translate into a burden for the economy as a whole because the throughputs in the exploitation of renewable resources is too slow and too disperse compared to those achieved in other economic sectors based on linear stock-flow exploitation” (GIAMPIETRO, 2019, p. 153-154)

modelo circular, não se opondo necessariamente ao aumento do reuso e reciclagem dos recursos, mas evidenciando que existe um limite técnico para essa expansão.

3.2- Blockchain

A tecnologia de blockchain pode ser explicada de maneira simples como uma solução online, de fonte aberta para registros distribuídos onde as transações entre diferentes agentes podem ser gravadas e atualizadas simultaneamente em tempo real (UPADHYAY A. et al, 2021, p. 2, tradução nossa)⁶. De modo mais técnico podemos a definir como:

uma cadeia de blocos conectados por funções *hash*. As funções *hash* são funções matemáticas fáceis de calcular a partir de um valor de entrada, porém praticamente impossível de encontrar o valor inicial a partir do valor modificado pela função. Essa característica da função *hash* confere ao *blockchain* a propriedade de imutabilidade uma vez que os dados são armazenados em blocos eles são submetidos a uma função *hash* e, conseqüentemente, não podem ser alterados. Qualquer tentativa de modificar os dados armazenados será notada, pois, alterará os valores finais da função *hash*. O *blockchain* é armazenado em múltiplos servidores, computadores, de modo que cada um pode ter a cópia completa de todos os registros na rede Peer-to-Peer (P2), que estão sincronizados de modo tal que a inserção de novos registros requer a validação da rede que estão sincronizados por determinados mecanismos de consensos. (PAIVA S. et al. ,2019, p. 160)

Ou seja, os blocos de informação gravados por meio da blockchain utilizam-se de um sistema *Peer-to-Peer*, para a validação de registros de modo a disponibilizar a informação computada a todos os usuários simultaneamente. Esse tipo de engenharia de dados para a validação pode ser determinado por diversos mecanismos de consenso, sendo o primeiro a ser implementado e amplamente utilizado até hoje o sistema *Proof-of-Work* (POW), que apresenta características não desejáveis do ponto de vista ecológico. Ainda nesse panorama, podemos citar o modo de validação *Proof-of-Stake* (POS), que busca uma alternativa menos dispendiosa de validação em relação ao POW, sendo preferível do ponto de vista ambiental.

O mecanismo de consenso é importante para a *blockchain* devido à natureza de validação, na qual cada bloco é validado de acordo com o conjunto de blocos anteriores. Por vezes isso pode gerar bifurcações que devem ser eliminadas com o objetivo de se criar um

⁶ No original: “Blockchain technology may be defined as an online, open-source distributed ledger where transactions between different stakeholders can be recorded and updated simultaneously and in real-time” (UPADHYAY A. et al, 2021, p. 2)

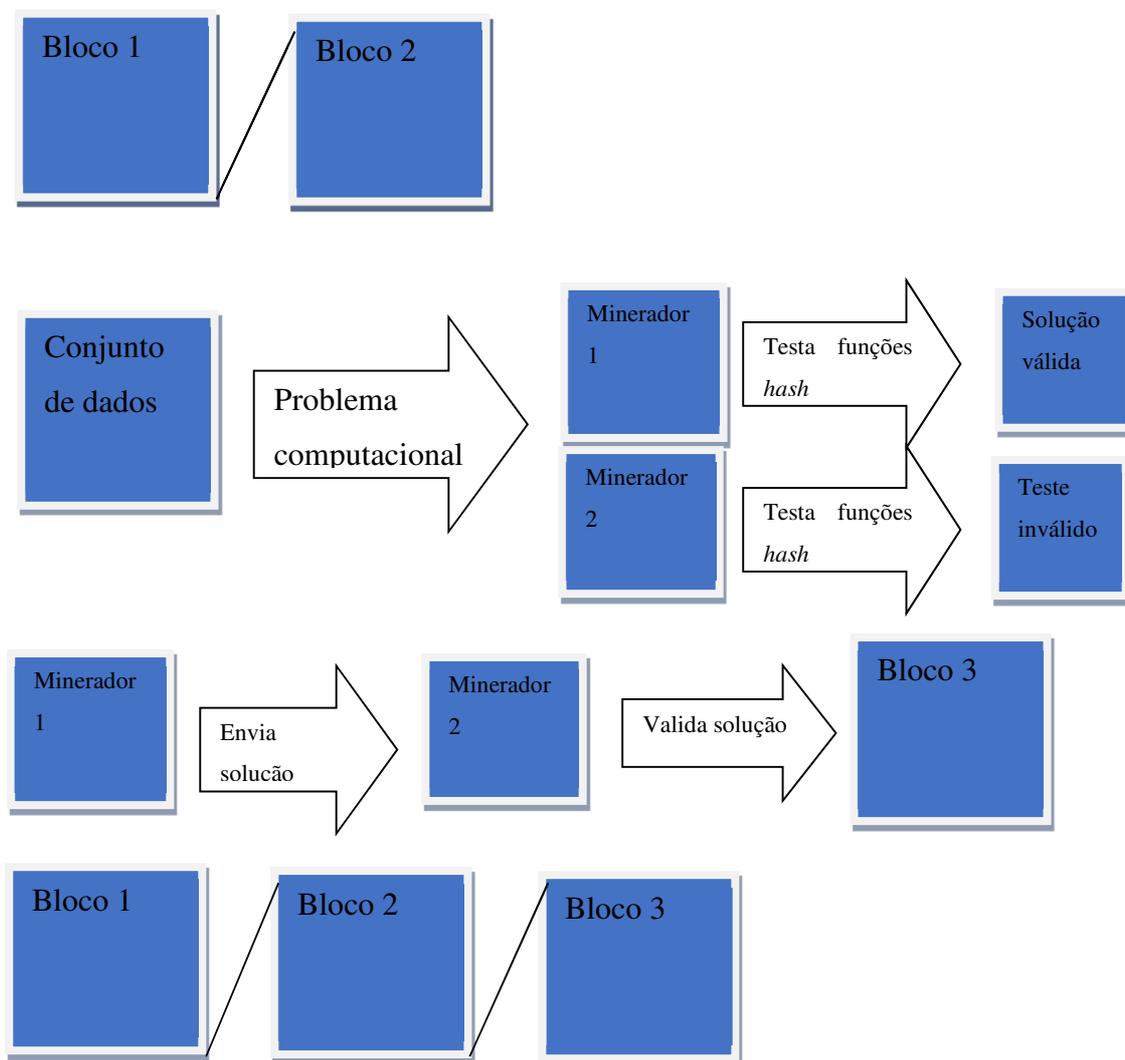
registro único e confiável: “ensuring that entries eventually become part of a blockchain's unique accepted history necessitates having an effective consensus achievement process” (SALEH F., 2018, p. 7).

O sistema POW resolve a questão do consenso oferecendo uma recompensa para que novos blocos sejam ligados a cadeia. Porém, para que isso ocorra é necessário que seja resolvido um problema computacional, que está ligado a uma cadeia específica de blocos onde o novo bloco será gravado, de modo que, se houver uma bifurcação, esta é eliminada pela coordenação dos agentes que competem com poder de processamento para resolução do problema. O consenso dos agentes nesse caso, portanto, requer poder computacional, e a estrutura de incentivos do POW desencadeia uma corrida armamentista computacional, que se manifesta em um nível exorbitante de gastos de energia (SALEH F., 2018, p. 7, tradução nossa)⁷.

Em uma terminologia mais adequada para as *blockchains* que utilizam POW, os agentes são denominados mineradores, o problema computacional se dá por base de uma função de via única, que pode mudar de acordo com a rede em questão, por exemplo a Bitcoin utiliza-se do sistema SHA256, sendo essa a função *hash* escolhida por suas propriedades únicas que garantem a segurança do sistema. Cada bloco gerado possui uma função *hash* específica que é associada à resolução do problema computacional, uma vez que a solução desse problema é encontrada, essa é atualizada para os demais mineradores que validam a solução gerando assim consenso na rede de dados de maneira descentralizada.

⁷ No original: “Solving one of the aforementioned puzzles, however, requires computational power, and PoW's incentive structure triggered a computational arms race that manifests in an exorbitant level of energy expenditure by PoW” (SALEH F., 2018, p. 7)

Figura. 1: Processo de adição de novos blocos com validação POW



Fonte: elaboração do autor.

POS resolve o problema de validação escolhendo aleatoriamente um agente que opera na *blockchain* para validar o próximo bloco, recompensando o agente pela escolha. Desse modo reduzindo a energia gasta a níveis negligenciáveis (SALEH F., 2018, p. 8, tradução nossa)⁸, porém isso pode gerar um problema de falta de consenso, onde é mais vantajoso para o agente continuar a bifurcação. Não obstante, com um nível suficiente de usuários e levando em conta a endogeneidade do valor da recompensa recebida o consenso pode ser atingido, como é

⁸ No original: "This protocol succeeds in reducing energy expenditure to negligible levels" (SALEH F., 2018, p. 8)

demonstrado por Fahad Saleh (2018) em seu paper “Blockchain Without Waste: Proof-of-Stake”, e como é observado em prática por *blockchains* que já utilizam desse modo de validação, como Tezos.

O modo como uma *blockchain* opera para o registro de dados é vantajoso para organização de cadeias de produção complexas e distribuídas, pois confere características únicas de interesse, como a descentralização, a transparência, rastreabilidade e imutabilidade dos registros. As principais características desejáveis desse modo de registro são descritas por Fabíola Greve (2018) como:

Descentralização: As aplicações e sistemas são executados de maneira distribuída, através do estabelecimento de confiança entre as partes, sem a necessidade de uma entidade intermediária confiável. Esse é o principal motivador para o crescente interesse na blockchain.

Disponibilidade e Integridade: Todo o conjunto de dados e transações são replicados em diferentes nós de maneira segura, de forma a manter o sistema disponível e consistente.

Transparência e Auditabilidade: Todas as transações registradas no livro-razão são públicas, podendo ser verificadas e auditadas. Além disso, os códigos da tecnologia costumam ser abertos, passíveis de verificação.

Imutabilidade e Irrefutabilidade: As transações registradas no livro-razão são imutáveis. Uma vez registradas não podem ser refutadas. Atualizações são possíveis a partir da geração de novas transações e realização de novo consenso.

Privacidade e Anonimidade: É possível oferecer privacidade aos usuários sem que os terceiros envolvidos tenham acesso e controle dos seus dados. Na tecnologia, cada usuário gerencia suas próprias chaves e cada nó servidor armazena apenas fragmentos criptografados de dados do usuário. Transações são até certo ponto anônimas, com base no endereço dos envolvidos na blockchain.

Desintermediação: A blockchain possibilita a integração entre diversos sistemas de forma direta e eficiente. Assim, é considerada um conector de sistemas complexos (sistemas de sistemas), permitindo a eliminação de intermediários de maneira a simplificar o projeto dos sistemas e processos.” (GREVE et al., 2018, p. 3-4).

Por oferecer essas propriedades, a *blockchain* vem sendo explorada para diversos usos em trabalhos teóricos e práticos. Especificamente no interesse desse projeto, vem sendo discutido o seu uso para o benefício da organização de uma economia circular, que se beneficiaria de uma ferramenta confiável de larga escala para o arranjo das cadeias produtivas e de reutilização dos materiais.

3.3- Implicações do *Blockchain* para o meio ambiente

Na integração entre economia circular e *blockchain*, vemos que existe um potencial de utilização, tendo em vista que um sistema de informação transparente é um dos blocos fundamentais para a construção de redes de fluxos de materiais de forma não linear:

One of the system conditions is an infrastructure for information sharing and platforms for collaboration. This infrastructure is essential to a circular economy, as shared and transparent information are the foundation for building different resource and material flows (BÖCKEL A. et al, 2021, p. 528).

Apesar dos potenciais usos para benefício do meio ambiente, o maior uso atual continua sendo no setor financeiro, na produção de ativos especulativos que se autodenominam moedas, ou criptomoedas. Esses criptoativos tiveram um rápido crescimento em popularidade em especial nos últimos 2 anos com o surgimento dos *Non-Fungible-Tokens* (NFT) usados principalmente no mercado de arte digital, que sofreu um crescimento exponencial em 2021 e chamou a atenção para o problema das emissões de carbono geradas no processo de criação dos criptoativos em especial das NFTs. “Each single Ethereum transaction is estimated to cause 85.47 kgCO₂ resulting from the mining devices involved in verifying the transaction, and there were 942,812 NFT sales in the month preceding October 10, 2021.” (TRUBY J. et al, 2022, p. 5).

A Ethereum é a *blockchain* como maior número de NFTs e a segunda maior em número de transações no mercado atualmente, perdendo apenas para a Bitcoin que é ainda mais dispendiosa, com uma pegada de carbono anual estimada em 83.44 MtCO₂ (83,440,000,000 kgCO₂) (TRUBY J. et al, 2022, p. 5, tradução nossa)⁹. O criador da Bitcoin saiu de cena em 2011 dificultando mudanças no seu protocolo de validação, e deixando-a presa ao POW. “Bitcoin’s decentralised network relies upon its original white Paper that does not envision changing its consensus protocol regardless of its emissions levels” (TRUBY J. et al, 2022, p. 5).

⁹ No original: “With an estimated annual carbon footprint of 83.44 MtCO₂ (83,440,000,000 kgCO₂),” (TRUBY J. et al, 2022, p. 5).

Apesar dos esforços por parte da equipe por trás da Ethereum para transacionar o modo de validação atual para POS por ser menos dispendioso, os gastos com o processo de mineração para verificar as transações consomem uma quantidade de energia similar a República da Irlanda, isso apenas para uma das milhares de plataformas disponíveis. (TRUBY J. et al, 2022, p. 4, tradução nossa)¹⁰. O problema toma proporções ainda maiores quando é levado em conta que apesar do uso de *blockchains* para NFT ser grande e as transações em Ethereum serem assustadoras, os criptoativos ainda são responsáveis por muitas vezes mais emissões que NFTs. Quando comparado com a Bitcoin, que é 10 vezes mais poluente por transação que o Ethereum (TRUBY J. et al, 2022, p. 5, tradução nossa)¹¹ percebemos que o escopo do problema vai além do que apenas uma ou outra *blockchain* mudando seu sistema de validação, mas engloba um mercado crescente e não regulado, que por via de regra se importa com lucros e não com o dano que vem causando.

Mesmo com os danos ambientais que o atual uso da *blockchain* vem causando há autores como Alexa Böckel (2021) que acreditam que a tecnologia é um facilitador chave para superar os desafios em direção a uma economia circular (BÖCKEL A. et al, 2021, p. 525, tradução nossa)¹². A construção de uma rede de informações distribuída e de confiança, não só facilita na criação de cadeias de recursos mais circulares, mas também facilita a tomada de decisão dos agentes rumo a economia circular. Na teoria os usos da tecnologia podem ser aplicados as mais diversas áreas da atividade humana e de fato há estudos para implementação de *blockchain* para diversos setores de interesse ambiental.

Studies connected to sustainability research explored the benefits for managing and fostering biodiversity in indigenous knowledge systems, increasing accountability in carbon markets and tracing carbon emissions in the fashion industry (BÖCKEL A. et al, 2021, p. 527).

Para Böckel (2021), o maior potencial de contribuição da *blockchain* para a economia circular está na construção de um sistema de informação, confiável, acessível

¹⁰ No original: “mining processes to verify transactions consume a similar amount of energy to the Republic of Ireland, and it is only one of the thousands of platforms available” (TRUBY J. et al, 2022, p. 4).

¹¹ No original: “Bitcoin, which is approximately 10 times more polluting than Ethereum per transaction” (TRUBY J. et al, 2022, p. 5).

¹² No original: “blockchain technology has been identified as a key enabler to overcome challenges towards a circular economy” (BÖCKEL A. et al, 2021, p. 525)

e rastreável para os agentes que nele operam. “By building up a shared information infrastructure on a blockchain, the technology can enable circular sourcing of renewable inputs and support resource efficiency” (BÖCKEL A. et al, 2021, p. 528).

De modo a sumarizar a tabela (Tabela. 4) abaixo apresenta os principais pontos debatidos e argumentos apresentados nesse estudo, quanto aos danos e potenciais benefícios da tecnologia.

Tabela. 4: Principais características benéficas e danosas da *blockchain*

BENÉFICAS	PRINCIPAIS BENEFÍCIOS	DANOSAS	PRINCIPAIS PROBLEMAS
rastreabilidade	Aumenta a confiabilidade, permite melhor controle de procedência das cadeias produtivas e ajuda na automatização das mesmas.	Protocolo POW	Causa uma competição desnecessária de poder computacional para validar os dados da rede, aumentando os gastos com energia.
descentralização	Muda o foco de confiabilidade de agentes centralizados para rede descentralizada, aumentando assim a segurança dos dados	Utilização atual	A maioria das aplicações práticas da tecnologia se dão na área financeira, que por muitas vezes não se atenta aos danos ambientais que possa estar causando
imutabilidade	Impede alterações nos dados do sistema gerando maior confiança nos dados e evitando possíveis alterações de agentes a rede	Obsolescência do capital	Grande parte do capital utilizado na validação pelo protocolo POW se torna obsoleto rapidamente ocasionando em uma quantidade não negligenciável de lixo eletrônico sendo gerado pela atividade
transparência	Permite que diferentes agentes das cadeias produtivas tenham acesso em tempo real a informações importantes para a tomada de decisão, melhorando a agilidade das cadeias produtivas.	Matriz energética	A matriz energética utilizada afeta diretamente a quantidade de gás carbono que a atividade emite.

Fonte: elaboração do autor.

Com base nos referenciais teóricos explorados, esse trabalho tem como objetivo estruturar uma revisão crítica dos usos da *blockchain* no panorama econômico, tendo em vista

o quão recente é o fenômeno torna-se importante pavimentar o caminho para discussão e exploração do tema em relação a seus efeitos no meio ambiente e suas utilizações práticas e teóricas.

4- Como a tecnologia Blockchain pode favorecer a economia circular

O uso da tecnologia *blockchain* para solução de problemas nas diversas áreas de organização, vem se mostrando promissor, mesmo que ainda no estágio inicial da tecnologia. Entusiastas da tecnologia e da indústria 4.0, apontam que as características únicas do sistema *blockchain*, como transparência, rastreabilidade e imutabilidade, são fundamentais para aumentar a segurança e confiança em sistemas integrados complexos e cada vez mais digitais, que prometem melhorar a forma como organizamos nossas cadeias de produção, incentivando comportamentos sustentáveis, dividindo informações e integrando diversas áreas do conhecimento. Essa seção busca fazer uma análise dos motivos pelos quais a *blockchain* se apresenta como solução em tantas áreas diferentes, assim como observar alguns potenciais usos e discutir seus principais desafios, focando principalmente na ideia de sustentabilidade ambiental e como essas implementações ajudam a alcançar os objetivos almejados pela economia circular.

4.1- Soluções e desafios oferecidos pela tecnologia

A confiabilidade na rede *blockchain* se dá principalmente pela sua capacidade de gerar consenso descentralizado, não dependendo de confiabilidade em atores isolados ou centralizados. Ao contrário de outros sistemas de armazenamento de dados, a *blockchain* atinge isso através de seu sistema de validação capaz de gerar consenso entre usuários anônimos e distribuídos, isso em junção com a robustez do sistema que torna a alteração dos dados inseridos uma possibilidade distante, tornando os dados seguros e confiáveis. Dessa maneira, o sistema permite um nível maior de segurança quando comparado a outros sistemas de armazenamento de dados. Outro ponto chave apontado como desejável é sua transparência e acessibilidade, onde para *blockchains* públicas qualquer pessoa com acesso a um computador e internet pode criar uma cópia dos dados armazenados em sua máquina e virar um dos pontos onde a rede é armazenada. Essa mecânica de armazenamento também é vantajosa para proteger os dados da rede de eventuais ataques físicos ou focalizados, que para ter sucesso teria que alterar todos os

pontos espalhados da rede, tarefa que se torna cada vez mais difícil quanto maior for a rede de usuários.

A possibilidade de usar a rede distribuída de computadores como uma máquina virtual para rodar programas, mais conhecidos como *Smart Contracts*, de forma autônoma também é um ponto forte apresentado pela tecnologia, visto que isso proporciona a rede executar tarefas complexas sem necessidade de intermediários estatais burocráticos, sendo a automatização de processos um dos focos da indústria 4.0.

What makes blockchain attractive to different sectors are the principles underpinning the technology, namely, peer-to-peer sharing, distributed storage capability, tamper-resistant security and the potential for secure automation. (UPADHYAY *et. al.*, 2021, p. 126133)

Esmaellian *et. al.* (2020), separa as contribuições da *blockchain* para a sustentabilidade ecológica em quatro frentes principais: [1] Promover comportamento sustentável; [2] aumentar visibilidade do ciclo de vida do produto; [3] melhorar eficiência de operações e sistemas; e [4] melhorar os relatórios de sustentabilidade e monitoramento. (ESMAEILIAN, *et. al.*, 2020, p. 105071, tradução nossa)¹³.

Quanto a primeira frente, os autores argumentam sobre o uso de criptoativos dentro de *blockchains* específicas como remuneração por comportamentos sustentáveis do usuário. Nesse modelo, a rede recompensa os usuários por comportamentos como compra de produtos sustentáveis, ou ir de bicicleta até o trabalho, onde o monitoramento dessas atividades é feito tanto por protocolos dentro da rede quanto por meio de IOT. Para que esses incentivos sejam de fato funcionais é necessário que o criptoativo remunerado possa ser utilizado como meio de troca em algum momento, o que pode acabar se tornando um problema, pois o usuário poderia utilizar desse meio de troca para adquirir produtos não sustentáveis, ocasionando mais danos ao meio ambiente.

A segunda frente trata da vantagem da imutabilidade, tornando a *blockchain* uma ótima plataforma para monitoramento do processo produtivo dos bens desde o seu início até o consumidor final, o que facilitaria o processo decisório dos consumidores em escolher produtos éticos e sustentáveis, assim como facilitaria processos de reciclagem, ajudando a circularização

¹³ No original: “(1) promoting green behaviour; (2) enhancing product lifecycle visibility; (3) improving operations and systems efficiency; and (4) improving sustainability reporting and monitoring.” (ESMAEILIAN, *et. al.*, 2020, p. 105071)

do processo produtivo. A ideia é que por meio da utilização de IOT para coleta de dados no mundo físico dos materiais envolvidos no processo produtivo e da *blockchain* para a disponibilização desses dados, os processos se tornariam mais transparentes, automatizados e os dados coletados seriam armazenados de maneira segura, gerando confiabilidade nos usuários. “A transparent and traceable product lifecycle can further close product lifecycle loops, decrease waste generation, decrease emissions, and engage governments, stakeholders, and users.” (ESMAEILIAN, *et. al.*, 2020, p. 105073).

A terceira frente atende a utilização da *blockchain* como meio de automatização de processos, cortando de maneira eficiente intermediários nas transações e promovendo a integração dos usuários, seja pela implementação de *Smart Contracts* ou pela natureza do processo *Peer-to-Peer*.

A última frente se refere ao uso da tecnologia *blockchain* para manter um registro imutável e transparente das atividades, melhorando assim sua tomada de decisões quanto as práticas sustentáveis das empresas e melhorando a informação disponível ao público dessas empresas. “Blockchain helps corporations improve their sustainability reporting systems by assisting them to monitor, manage and report their activities properly” (ESMAEILIAN, *et. al.*, 2020, p. 105075).

No intuito de categorizar os esforços que já vem sendo feitos para a utilização da tecnologia *blockchain* com focos sociais e ambientais, denominadas “*blockchain for good*”, Tomlison *et. al.* (2021) explora e organiza 28 sistemas de *blockchain* separando-os em 12 categorias distintas. Serão discutidas apenas as categorias que contribuem para o meio ambiente.

A primeira categoria mostra projetos onde o poder computacional utilizado na mineração de criptoativos é direcionado para resolver questões de pesquisa científica, dessa maneira contribuindo para a eficiência do uso energético e incentivando o uso de poder computacional latente para fins de pesquisa, dando propósito frutífero a esse consumo. No entanto, por mais importante que o avanço científico seja, esses projetos ainda tem dispêndios comparados ao POW, e se existem limites rígidos para o uso sustentável de energia em um determinado nível de tecnologia, não é certo que a dedicação de mais desses recursos limitados

de energia à pesquisa científica computacionalmente intensiva seja a melhor maneira de atender às necessidades humanas (TOMLINSON *et. al.*, 2021, p. 453, tradução nossa)¹⁴.

A segunda categoria é análoga a primeira frente proposta por Esmellian *et. al.* (2020), onde os sistemas buscam incentivar comportamento sustentável dos usuários. Tomlison *et. al.* (2021) critica esses projetos no ponto que partem da boa vontade dos participantes de se comprometerem de maneira sustentável. Com exceção de um dos projetos analisados, permanece a ideia de que problemas ambientais podem ser resolvidos se fazendo mais bem e não se propõe frentes para reduzir os danos já causados. Para além disso esses sistemas partem de incentivos monetários na forma de seus criptoativos como forma de criar o incentivo.

A terceira categoria funciona de maneira similar a primeira, que busca incentivar comportamento sustentável. Porém, para atingir isso se utiliza de tokens que representam um impacto positivo como forma de incentivo. A ideia parte de criar um mercado para comercialização de externalidades, assim internalizando elas via mercado. Tomlison *et. al.* (2021) critica a ideia de que mercados sejam sempre a melhor solução para o problema e aponta que não seria vantajoso comercializar esses tokens de impactos que já foram pagos, uma vez que a comercialização dos mesmos não tem propósito real e nem utilidade para seu comprador. Isso faz com que seja mais vantajoso comprar um token novo pagando pela resolução de um novo impacto. Os projetos analisados falham em criar um mercado real.

A quarta categoria são projetos que buscam uma descentralização do mercado de energia, promovendo trocas entre agentes menores no mercado e incentivando a produção em menor escala de energia por meio de fontes renováveis. A utilização da *blockchain* garante que essas trocas sejam feitas diretamente entre os agentes, removendo o intermediário e barateando o custo de energia renovável.

A quinta categoria são projetos que buscam melhorar a transparência de cadeias produtivas, auxiliando os consumidores a incorrer em escolhas éticas de consumo. Aqui a ideia é que a *blockchain* possa melhorar a eficiência de cadeias produtivas e até mesmo ajudar na circularização dessas cadeias. No caso estudado por Tomlison *et. al.* (2021), o sistema garantiria que as informações sobre os produtos não poderia ser alterada e substituiria o intermediário que garante a origem ética dos produtos, assim ajudando tanto na formulação da escolha quanto diminuindo os custos finais dos produtos.

¹⁴ No original: “If there are hard limits to sustainable energy usage at a given level of technology, it is not a given that devoting more of those limited energy resources to computationally-intensive scientific research is the best way to meet human needs” (TOMLINSON *et. al.*, 2021, p. 453)

A última categoria analisada, que se alinha a questões ambientais, se refere a um projeto específico, a Carboncoin. Nesse projeto as taxas cobradas por transação do criptoativo são utilizadas para o esforço de reflorestamento e captação de carbono pelo plantio de árvores.

4.2- Sua utilização na circularização de cadeias produtivas e logística reversa

A *blockchain* como ferramenta para a melhora de eficiência e circularização de cadeias produtivas é um dos usos que mais se alinham com os objetivos da economia circular. Tendo isso em vista Centobelli *et. al.* (2022) elabora uma estrutura de implementação da tecnologia em cadeias produtivas circulares, tendo como base uma firma de reciclagem de material industrial proveniente da indústria automobilística e ferroviária. Para isso o autor elabora um sistema que integra três características das cadeias produtivas reversas (Reciclagem, Redistribuição e Remanufatura) com três características do sistema *blockchain* (Confiabilidade, Rastreabilidade e Transparência), avaliando a melhora na cadeia produtiva de reciclagem dentro de cada característica apresentada pela digitalização da cadeia com o uso de *blockchain*. Diferente de outros projetos propostos na área o autor se utiliza de uma rede privada para o sistema, de modo a criar uma hierarquia de acesso aos usuários da rede. Esse tipo de rede também permite o uso de outro sistema de validação para criar consenso, sendo o escolhido o sistema *Byzantine Fault Tolerance* (BFT). A rede é criada a partir do *Hyperledger Fabric*, um programa de fonte aberta desenvolvido pela Linux, que permite maior customização de sistemas *blockchain*. “Byzantine Fault Tolerance (BFT) mechanisms artificially create costs for the addition of new blocks and, therefore, discourage potentially harmful nodes from Interference.” (CENTOBELLI *et. al.*, 2022, p. 103513). Em seu argumento os autores defendem o uso de redes privadas para esse tipo de projeto, uma vez que permite a entrada apenas de agentes autorizados que atuam na área, aumentando a confiabilidade, diminuindo risco de ataques e podendo ser validado com menor dispêndio energético.

Após o desenvolvimento do sistema os autores avaliam os benefícios do uso da *blockchain* nas três frentes propostas: Confiabilidade, rastreabilidade e transparência. Em confiabilidade os autores argumentam que a rede consegue efetivamente mudar a confiabilidade antes centralizada em agentes individuais na rede de reciclagem para confiabilidade no sistema distribuído da *blockchain*. “After the blockchain implementation, the trust in the individual partners operating in the circular supply chain was integrated by the trust in the blockchain

technology” (CENTOBELLI *et. al.*, 2022, p. 103518). Quanto a melhoras em rastreabilidade, os autores apontam que enquanto o antigo sistema rastreava utilizando-se de e-mails, telefonemas, valor adicionado de rede e troca de informação eletrônica, e não adotava um sistema coordenado de rastreabilidade, após a implementação, a tecnologia *blockchain* possibilitou um sistema de rastreabilidade único quase em tempo real que permite atualizações rápidas e automáticas dos dados tornando a tomada as decisões de negócios eficientes e efetivas. (CENTOBELLI *et. al.*, 2022, p. 103518, tradução nossa)¹⁵. Por fim, quanto à transparência, o artigo aponta que a utilização da *blockchain* elimina a necessidade de autoridades centralizadas, assim como a imutabilidade dos dados armazenados, melhora a transparência do processo de reciclagem, melhorando a eficiência operacional de firmas individuais envolvidas no processo.

Em publicação de cunho similar, Nandi *et. al.* (2021) explora os desafios nas cadeias produtivas enfrentados durante a pandemia de Covid-19 e como a implementação ampla de sistemas baseados na tecnologia *blockchain* podem ajudar a combater os problemas encontrados em nível global e local. Em sua análise os autores destacam os problemas de logística na pandemia como deficiência nas áreas de localização, agilidade e digitalização das cadeias produtivas.

A pandemia evidenciou a fragilidade de localização das cadeias produtivas, especialmente as globais. Com o medo de infecções por meio de produtos importados, vários produtos sofreram uma queda nas suas vendas, mesmo que ainda fossem demandados, em certos casos a produção local desses bens era preferível, mesmo não atendendo a demanda local, o que gerou aumento de preços nesses produtos. A agilidade de adaptação das cadeias produtivas também se mostrou frágil, uma vez que a resposta de adaptação a diferentes níveis de demanda dos produtos poderia ter sido mais rápida, aumentos rápidos na demanda de equipamentos de proteção contra o vírus gerou uma escassez desses bens, que segundo Nandi *et. al.* (2021) poderia ter sido minimizado se a agilidade das cadeias produtivas fosse maior.

A digitalização de serviços se torna uma tendencia durante a pandemia, evidenciado pelas práticas de trabalho e ensino remoto adotadas durante a quarentena. Esse modo de produção se mostrou um importante auxílio para lidar com crises. Por precisar de menos transporte (custos, poluição e pessoal) e poder ser implementado dentro da economia circular.

¹⁵ No original: “After implementation, blockchain technology enables an almost unique and real-time tracking system that allows timely and automatic updates of status data in order to make efficient and effective business decisions.” (CENTOBELLI *et. al.*, 2022, p. 103518)

A crise de COVID-19 exemplifica como cadeias produtivas podem criar mais agilidade por meio da digitalização. (NANDI *et. al.*, 2021, p. 15, tradução nossa)¹⁶.

Como tecnologia de digitalização, Nandi *et. al.* (2021) apontam que a *blockchain* poderia ser implementada para tornar as cadeias produtivas mais robustas evitando parte das perdas em caso de crises. Quanto a localização, é apontado que a implementação de *blockchain* ajudaria a manter um registro confiável de inventário, ajudando a melhor tomada decisões evitando desperdícios e falta de material “Another example is MiPasa, a World Health Organization blockchain to help manage supply and information related to COVID.” (NANDI *et. al.*, 2021, p. 16). A disponibilidade rápida de informação promovida também melhora a agilidade das cadeias produtivas, tornando-as mais responsivas. Soluções de circularização das cadeias produtivas são exploradas como maneira de aumentar a agilidade das cadeias e evitar desperdício, posto que cadeias circulares se beneficiam da agilidade para serem capazes de receber seus insumos e reintegrá-los na produção. A rede de informação criada com a *blockchain* pode fomentar esse mercado ajudando a identificar fornecedores desses subprodutos numa perspectiva simbiótica do mercado (NANDI *et. al.*, 2021, p. 18, tradução nossa)¹⁷.

A utilidade da *blockchain* para as cadeias produtivas ocorre de forma a beneficiar vários aspectos da logística reversa, em específico Bekrar *et. al.* (2021) aponta sua utilidade na organização das cadeias de transporte. Ressaltando sua capacidade de manter transparência, exatidão e rastreabilidade de informação para diferentes agentes na cadeia produtiva, fazendo isso de forma segura. Além disso os autores destacam a utilização de *Smart Contracts* como forma de automatização das transações e o uso de Tokens como forma de incentivo a comportamento sustentável e validação de seguridade no transporte de diferentes materiais, que possam ser considerados perigosos. Um dos usos destacados é a capacidade de se monitorar através de sensores a localização de materiais e distribuir essa informação de forma eficiente para os agentes interessados na rede. A utilização de *Smart Contracts* é posta como um dos pontos fortes da tecnologia, uma vez que é possível através deles dispensar intermediários em transações, diminuído custos e aumentando a eficiência das redes.

For example, managing multiple players and companies, multiple sites and assets, and performing or executing multiple transactions simultaneously, in real time, and

¹⁶ No original: “The COVID-19 crisis exemplifies how supply chains can build agility through digitization” (NANDI *et. al.*, 2021, p. 15)

¹⁷ No original: “BCT can support this environment in identifying by-product partners in an industrial symbiosis perspective” (NANDI *et. al.*, 2021, p. 18)

under conditions or constraints would be among the activities that are perfectly suited to smart contracts. (BEKRAR *et. al.*, 2021, p. 2909)

Em um estudo de caso feito por Hrouga *et. al.* (2022), as propriedades da *blockchain* para organização de cadeias de produção é explorada em conjunto a implementação de IOT para melhorar o desempenho da coleta de amianto, sendo esse um dejetos não reciclável e perigoso, sua coleta e descarte deve ser feita de maneira transparente e responsável, minimizando assim os riscos associados ao material. A integração dos sistemas de IOT para o monitoramento do descarte de amianto é uma solução viável para a crítica de Esmailian (2020), pois, como as informações armazenadas na *blockchain* não podem ser alteradas, é de suma importância que os dados coletados sejam de confiança. A *blockchain* sozinha não pode garantir isso, mas os sensores de IOT aplicados em diversos pontos da logística de descarte garantem uma coleta de dados automatizada, deixando pouca margem para erros humanos e aumentam a confiabilidade nos dados armazenados. O estudo conclui ressaltando a importância da integração de tecnologias da indústria 4.0. Essa integração é de extrema importância e pode ajudar a atingir diversas metas sustentáveis quando em conjunto com a economia circular, como exemplificado por Dantas *et. al.* (2021) que explora não só o papel da *blockchain*, mas de todas as tecnologias consideradas na indústria 4.0 e sua relação com a economia circular e as metas de desenvolvimento sustentável (SDG) propostas pela Assembleia Geral das Nações Unidas.

Dantas *et. al.* (2021) argumentam que existe uma forte contribuição das tecnologias da indústria 4.0 e da estrutura de mercado proposta pela economia circular para resolução das metas envolvendo: Energia limpa e acessível (SDG 7), trabalho decente e crescimento econômico (SDG 8), inovação de indústria e infraestrutura (SDG 9), cidades e comunidades sustentáveis (SDG 11), consumo e produção responsável (SDG 12) e ação climática (SDG 13). A revisão de literatura feita por Dantas *et. al.* (2021) aponta um crescente interesse na interligação dessas áreas e como elas podem se beneficiar umas das outras. Partindo de uma ótica diferente para analisar a importância dessa interligação Cagno *et. al.* (2021) traça um importante paralelo entre a estrutura de produção ReSOLVE (Regenerate, Share, Optimize, Loop, Virtualize and Exchange) e os benefícios que diversas tecnologias da indústria 4.0 podem fornecer. Em particular a *blockchain* encontra-se interligada com tecnologias como IOT e Big

Data Analysis (BDA), contribuindo principalmente para a segurança de dados, com suas maiores contribuições sendo para as áreas de regeneração, distribuição e otimização.

The transparency and security of data exchange and any type of digital transactions can be guaranteed by the use of CYB (Cybersecurity and Blockchain); from a larger perspective, the use of CYB could also support supply chains in making their practices more transparent, secure and correct. (CAGNO *et. al.*, 2021, p. 3353)

Para além disso, uma das principais críticas que é explorada por Dantas *et. al.* (2021) é quanto à capacidade de geração de emprego das tecnologias da indústria 4.0, visto que maior automação dos processos pode levar a um aumento no nível de desemprego “Faced by this new context in which old jobs may become obsolete and leave many workers unemployed” (DANTAS *et. al.*, 2021, p. 221). A resposta fornecida para essa possibilidade é rápida adaptação da força de trabalho, porém essa possibilidade evidencia uma crítica ao modelo circular proposta pela economia ecológica, de que nem sempre é possível haver crescimento econômico e sustentabilidade andando em conjunto, uma vez que o processo produtivo para ser ecológico precisa respeitar os limites da biosfera. Outro ponto onde isso é evidenciado é novamente no trabalho de Hrouga *et. al.* (2022), enquanto a melhora na eficiência do descarte de produtos não recicláveis pode ocorrer através do uso da *blockchain* como tecnologia informacional, a existência desses produtos mostra que não é possível a circularização de todas as cadeias produtivas.

Para melhor circularização das cadeias, e tomada de decisão sobre quais produtos devem continuar a ser produzidos ou não na economia circular, a tecnologia *blockchain* pode novamente ajudar no processo decisório, como é explorado por Kouhizadeh *et. al.* (2019). A escolha de parar de produzir certo produto dentro da economia circular exige um grande nível de informação, visto que mesmo que aquele produto não seja reciclável, como o caso do amianto “Traceability of wastes is critical, especially for hazardous wastes. Stakeholders can use blockchain information to evaluate efficiency of waste exchange programs.” (KOUHIZADEH *et. al.*, 2019, p. 1723), alguns subprodutos da sua produção podem ter valor como insumo para outras produções. Por isso um sistema de informação robusto é desejável para a coordenação produção entre diversos agentes de uma economia circular.

Kouhizadeh *et. al.* (2019) exploram como a *blockchain* pode auxiliar o processo decisório do fim de produção em economias circulares, levando em conta soluções em nível

macro, meso e micro. Em nível macro evidencia-se a contribuição da *blockchain* para auxiliar decisões em economias compartilhadas e de serviços, energia e mercado secundário de materiais. Em nível meso, os benefícios destacados são em logística reversa, simbiose industrial e monitoramento de cadeias produtivas. Por fim, no nível micro os benefícios se dão nas áreas de organização de valor e conhecimento e comportamento do consumidor.

Para Kouhizadeh *et. al.* (2019), as características de imutabilidade, rastreabilidade e formação de consenso descentralizado da *blockchain* são necessárias para a tomada racional de decisões dentro de uma rede complexa de cadeias produtivas circulares. Ajudando a avaliar a real necessidade da produção de certos bens e serviços, os autores argumentam que é necessário um olhar crítico a produção, descartando-se daqueles produtos que não tiverem uma boa circularidade, aqueles que tem menor tempo de vida e que não geram tanto valor quando recolhidos no final de seus ciclos de uso. “Those Products with poor sharing value and with durability issues, e.g., contains short-term components and circularity concerns, can be candidates for removing them from the product portfolio.” (KOUHIZADEH *et. al.*, 2019, p. 1720-1721). A escolha da parada de produção de certos bens se alinha com o conceito da economia circular de preferir bens que possam ser mais bem reciclados e substituir bens de baixa circularidade por bens recicláveis, como proposto pelo C2C, onde os bens devem ter sua reciclagem em mente desde a concepção. Se alinha também à ideia da economia ecológica de que a produção material não pode ser crescente para sempre. Assim, a lógica de reduzir a produção em determinadas cadeias confronta a expansão do portfólio de produtos, e propõe um olhar crítico sobre aquelas mercadorias que devem ou não continuar sendo produzidas. Mesmo que o decrescimento de alguns setores e cadeias produtivas não seja o mais confortável para o consumidor, no curto prazo, a produção econômica estaria, no longo prazo, mais alinhada à capacidade da biosfera prover recursos materiais, serviços de regulação fundamentais à vida, incluindo a reabsorção de resíduos da economia.

5- Os problemas ambientais acarretados pelo atual uso da Blockchain

5.1- Funcionamento do Proof of Work

Para a melhor compreensão dos danos causados pelo atual uso da tecnologia de *blockchain* é importante compreender, ao menos superficialmente, o funcionamento deste tipo

tecnologia. Os processos pelos quais funciona a *blockchain*, também são os que garantem sua seguridade, transparência e imutabilidade, aspectos destacados como solução das cadeias de dados envolvendo tecnologias da indústria 4.0 e logística reversa de cadeias produtivas, como explorado no capítulo anterior.

Uma *blockchain* nada mais é do que uma cadeia de blocos de dados agrupados e validados pelos blocos anteriores. O protocolo de validação é o ponto focal de diversas discussões devido à grande variabilidade de uso de eletricidade apresentada entre os diferentes protocolos. Protocolos como o POW, inferem de gastos naturalmente maiores por necessitarem em sua validação de variáveis dentro da esfera física, no caso do poder computacional de máquinas físicas, enquanto protocolos como POS necessitam para sua validação variáveis contidas na própria rede, sendo essa variável a quantidade de ativos presentes no sistema.

As duas maiores redes de *blockchain* hoje, em termos de valor de mercado, (Bitcoin e Ethereum) utilizam-se do meio de validação *Proof of Work*, o que acentua os gastos gerados pela utilização de *blockchains* no geral. Se levado em conta o efeito da economia de escala na produção dos ativos vemos que esse tipo de protocolo não somente representam um risco ambiental, mas um risco para a descentralização da rede.

5.2- Como Proof of Work afeta negativamente o meio ambiente

Estudos vêm sendo desenvolvidos com o intuito de estimar o gasto de energia que hoje é usado na produção de ativos digitais, com POW. Há um debate metodológico sobre qual dessas variáveis seria mais precisa na estimação dos gastos de energia. O número de transações desses ativos ou a taxa de *hashes* que são computados em um certo período de tempo. Mora *et. al.* (2018) usa para a estimação o mesmo método utilizado nos trabalhos produzidos pelo Digeconomist, levando em conta o número de transições para estimação da energia gasta e, por consequência, da emissão de carbono, Masanet *et. al.* (2019) critica esse resultado se opõe ao uso de transações como meio de estimar o gasto futuro de energia, propondo a estimação por meio da dificuldade computacional. “The use of transactions as the driver of future Bitcoin emissions is questionable, given the tenuous correlation between transactions and mining energy use.” (MASANET, E. et al, 2019, p. 653).

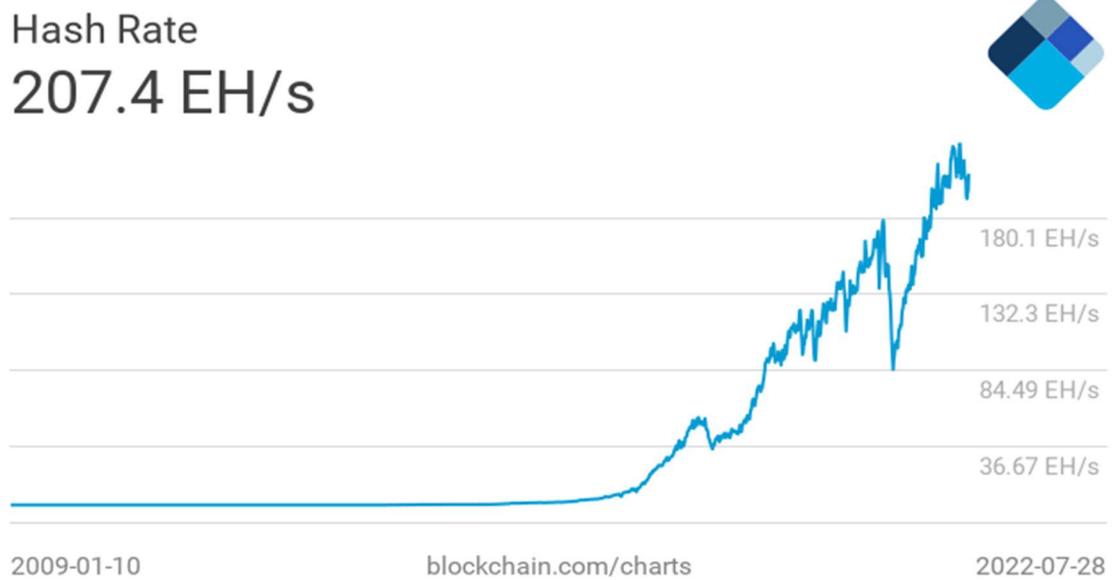
A taxa *hash*, proposta como meio de estimação dos gastos de energia para *blockchain* é uma medida de poder computacional por segundo, ou seja, hash/segundo é o número de cálculos de função *hash* que são operacionalizadas em um segundo por determinada unidade de processamento. Por exemplo a taxa de *hash* estimada para Bitcoin no final de 2021 era de 168.201 Terahashes/segundo, como aponta o site blockchain.com, que faz suas estimativas com base no número de blocos minerados nas últimas 24 horas. Ainda sobre a taxa *hash* da Bitcoin, e por extensão de outros sistemas que utilizam POW, existe uma correlação com o valor de mercado de um criptoativo e a taxa *hash* do sistema, como apontado por Budish (2018).

Mineradores estão engajados em uma competição onde entram no mercado se os custos de mineração são superados pelos lucros. Um aumento no valor de mercado de um criptoativo então atrai mineradores para aquele ativo à medida que o custo marginal de produção é menor que o lucro, para o mercado de criptoativos argumenta-se que o custo marginal é igual ao custo de energia, ou seja uma vez que o valor de um criptoativo tem um aumento marginal que ultrapasse seu custo energético de produção os agentes são incentivados a intensificar a mineração, com a entrada de novos agentes o número de agentes na rede equilibra-se novamente quando o lucro marginal é zero. Nesse cenário um aumento no valor gera um aumento no poder computacional global utilizado para mineração.

Apesar da conclusão lógica da relação entre a taxa *hash* e o valor de mercado de determinado criptoativo ter respaldo na teoria microeconômica da oferta das firmas, essa relação é criticada em trabalhos empíricos “The hashrate reflects the size of the Bitcoin network, of how many miners are trying to gain the right to add the next block. However, the hashrate does not reflect the market price.” (KÖHLER *et. al.*, 2019, p.13601). Permanece em discussão a utilização desse parâmetro como estimativa dos gastos em uma rede *blockchain*. Mesmo com os debates metodológicos, a literatura empírica no tópico confirma de modo geral a crescente tendência de consumo elétrico da Bitcoin e de modo mais geral das operações de mineração baseadas em POW (SCHINCKUS, 2021, p. 3-4, tradução nossa)¹⁸.

¹⁸ No original: “Despite these methodological debates, the empirical literature on the topic generally confirms the growing trend in the Bitcoin’s electricity consumption and more generally in POW-based mining operations.” (SCHINCKUS, 2021, p. 3-4)

Figura. 2: Taxa Hash da Bitcoin ao decorrer dos anos



Fonte: <https://www.blockchain.com/pt/charts/hash-rate>

O funcionamento do sistema de validação POW então incorre em custos elevados de eletricidade, uma vez que promove uma competição computacional entre os agentes na *blockchain*. Em 2019, Stoll *et. al.* (2019) estima a pegada de carbono da Bitcoin utilizando-se da geolocalização dos mineradores assim como o consumo médio de energia utilizado, chegando ao consumo equivalente ao país do Sri Lanka apenas para mineração de Bitcoin. “We find that the annual global carbon emissions of Bitcoin range between 22.0 and 22.9 MtCO₂, a ratio that sits between the levels produced by Jordan and Sri Lanka and is comparable to the level of Kansas City” (STOLL *et. al.*, 2019, p. 1654). Apesar de aparentar pouco quando comparado a emissão total industrial, é preciso lembrar que a Bitcoin é apenas um criptoativo em um mar de outras aplicações semelhantes, de fato Stoll *et. al.* (2019) propõe que o gasto estimado de 3 outros criptoativos podem somar cerca de 30 TWh e que os gastos somados dos demais 618 criptoativos seria estimado em 40TWh. Köhler *et. al.* (2019), propõe que as emissões da Bitcoin em 2018 foram cerca de 17.29 MtCO₂, valor um pouco abaixo dos encontrados por Stoll *et. al.* (2019), isso se acontece devido ao impacto que diferentes suposições sobre a geolocalização e matriz energética tem sobre a emissão de carbono. Uma crítica a estimativa de Stoll *et. al.* (2019) é que esse estudo calcula o resultado baseado em apenas um valor de taxa *hash* (a taxa *hash* medida no dia em que a análise é feita) ao em vez

de calcular o total de *hashes* realmente computados no ano (KÖHLER *et. al.*, 2019, p.13601, tradução nossa)¹⁹. Para uma melhor avaliação de como esses gastos afetam a emissão total de carbono gerada pelo mercado de criptoativos, seria necessário um estudo que estimasse a distribuição dessas produções afim de determinar o tipo de matriz elétrica utilizada por elas, porém apenas pelo consumo de energia podemos observar que as emissões estimadas na rede da Bitcoin são apenas uma fração do real problema ambiental.

Em visões ainda mais pessimistas, as emissões de carbono geradas pela Bitcoin poderiam sozinhas empurrar o aquecimento global acima da marca dos 2°C. Para Mora *et. al.* (2018), o crescente uso da *blockchain* para aplicações financeiras representa um perigo real e iminente ao planeta “the cumulative emissions of such usage growth could fall within the range of emissions likely to warm the planet by 2°C within only 16 years” (MORA *et. al.*, 2018, p. 932), estimando a emissão de carbono gerada pela Bitcoin em 2017 em 69 MtCO₂, um valor 3 vezes maior do que o estimado por Stoll em 2019. Mora *et. al.* (2018) aponta que a porcentagem relativa das transações virtuais feitas em Bitcoin representam um valor muito pequeno do mercado total, aproximadamente apenas 0,033% das transações, isso levanta a questão de ineficiência, mesmo compondo uma pequena parcela do mercado a Bitcoin ainda exaure uma quantidade considerável de recursos.

Hayes (2015) propôs um modelo de custo para a mineração de Bitcoins, modelando o comportamento microeconômico das firmas que decidem minerar. Hayes ressalta que as firmas incorrem em sua decisão levando principalmente em conta quatro fatores: [1] o custo da eletricidade, medido em centavos por quilowatt-hora; [2] o consumo de energia por unidade de esforço de mineração, medido em watts por GH/s, uma função do custo da eletricidade e da eficiência energética; [3] o preço monetário da Bitcoin no mercado; e [4] a dificuldade do algoritmo Bitcoin (HAYES, 2015, p. 2, tradução nossa)²⁰. Enquanto os fatores 1, 2 e 4 são

¹⁹ No original: “Deviations from previous studies are due to the fact that, for example, de Vries, Stoll *et. al.* and McCook calculate their results based on one hashrate value only (the hashrate measured on the day their analysis was performed) instead of calculating the total amount of hashes actually mined in a year.” (KÖHLER *et. al.*, 2019, p.13601)

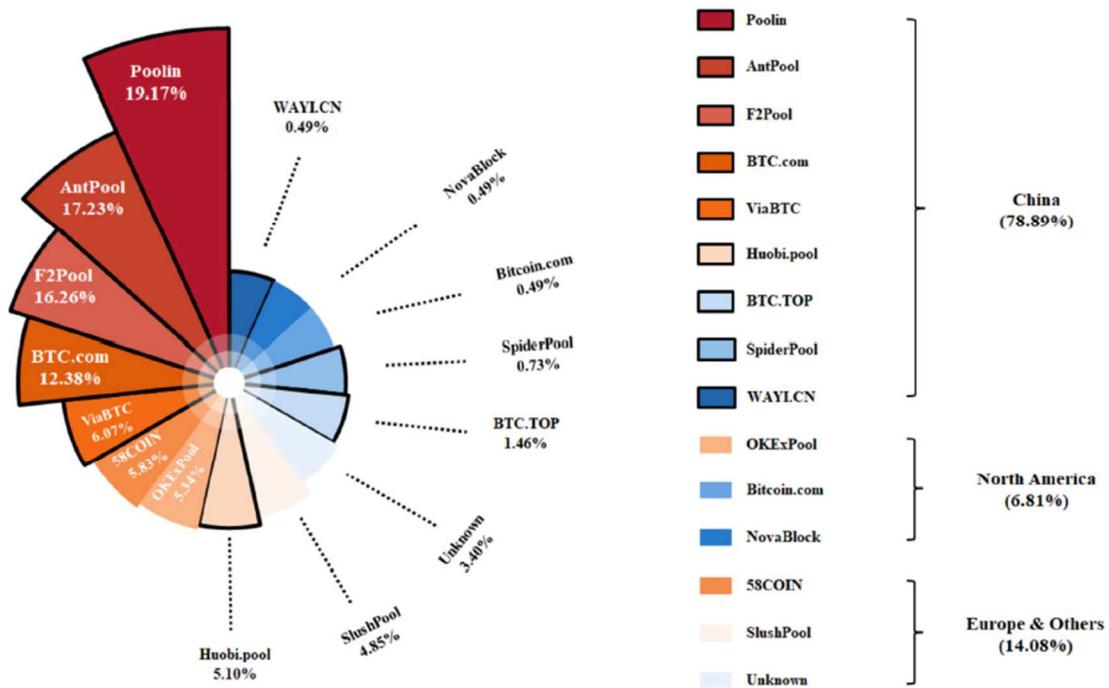
²⁰ No original: “[1] the cost of electricity, measured in cents per kilowatt-hour; [2] the energy consumption per unit of mining effort, measured in watts per GH/s, a function of the cost of electricity and energy efficiency; [3] the monetary price of bitcoin in the market; and [4] the difficulty of the bitcoin algorithm” (HAYES, 2015, p. 2)

ligados aos custos de produção o fator 3 denomina a receita. O fator 2 é dado principalmente pela eficiência do capital empregado no esforço de mineração, que Hayes assume como preço afundado, o fator 4 e 3 são exógenos sendo determinados pelo algoritmo em funcionamento e pelas forças de mercado respectivamente. O fator 1, preço da eletricidade, também é dado uma vez que o agente já estabeleceu o local de suas operações, porém como é um dos poucos fatores que podem ser ativamente mudados pelo agente, locais com menores custos de eletricidade tendem a atrair mais atividade mineradora. Esse fator pode se tornar um problema, uma vez que eletricidade barata não necessariamente se reflete em fontes renováveis de eletricidade, levando em conta a concentração das mineradoras na China, o escopo do problema fica ainda mais assombroso, visto que qualquer criptoativo minerado na China geraria quatro vezes mais CO2 se comparado com o que geraria no Canadá por exemplo (KRAUSE *et. al.*, 2018, p. 716, tradução nossa)²¹. De fato, estima-se que até o banimento completo de transações financeiras feitas com criptoativos na China em 24/09/2021, cerca de 75% das operações de mineração de Bitcoin operavam no país.

Due to the proximity to manufacturers of specialized hardware and access to cheap electricity, majority of the mining process has been conducted in China as miners in the country account for more than 75% of the Bitcoin network's hashing POWER (JIANG *et. al.*, 2021, p. 1940)

²¹ No original: “any cryptocurrency mined in China would generate four times the amount of CO2 compared to the amount generated in Canada” (KRAUSE *et. al.*, 2018, p. 716)

Figura. 3: Distribuição das mineradoras no total da rede Bitcoin em abril de 2020



Fonte: JIANG *et. al.*, 2021, p. 1940

Jiang *et. al.* (2021) oferece uma perspectiva interessante da situação da China em relação a mineração de Bitcoin no país, estimando emissões de carbono para vários cenários de intervenção. Os quatro cenários propostos são: [1] Cenário de referência, onde tudo mantido constante de acordo com as regulações vigentes na época da produção do trabalho; [2] cenário de regulação de acesso, onde é imposto um nível de eficiência para que seja permitido a entrada no mercado, deixando apenas os mineradores mais eficientes produzirem; [3] cenário de regulação de sítio, onde regulações mais estritas seriam tomadas em cima dos mineradores em áreas com matriz elétrica a base de carvão; [4] cenário de imposto sobre a produção de carbono gerada pela mineração. No cenário de referência Jiang *et. al.* (2021) estima que o pico da produção se daria em 2024, utilizando um total de 296.59 TWh de eletricidade no ano em questão, o que excede o nível de eletricidade utilizada em países como Itália e Arábia Saudita alcançando o rank em décimo segundo entre todos os países em 2016. (JIANG *et. al.*, 2021, p. 1939, tradução nossa)²². O autor leva em conta nas suas estimativas que cerca de 40% da produção está sendo feita em áreas de matriz energética termoeletrica proveniente da queima

²² No original: “We find that the annualized energy consumption of the Bitcoin industry in China will peak in 2024 at 296.59 Twh [...] This exceeds the total energy consumption level of Italy and Saudi Arabia and ranks 12th among all countries in 2016” (JIANG *et. al.*, 2021, p. 1939)

de carvão, enquanto os 60% restante estariam em áreas de matriz hidroelétrica. “As suggested by the actual regional statistics of Bitcoin miners, we assume 40% of miners are located in the coal-based area in the Benchmark scenario.” (JIANG *et. al.*, 2021, p. 1940).

Os dados quanto a distribuição das mineradoras entre áreas intensivas em termoelétricas e hidroelétricas são similares aos utilizados por Stoll. *et. al.* (2019), que por sua vez utiliza-se do banco de dados encontrado nas estatísticas regionais da BTC.com, que sugerem uma divisão de 58% contra 42% entre regiões ricas em hidroelétricas e regiões com alto teor de termoelétricas na China respectivamente. (STOLL, 2019, p. 1656, tradução nossa)²³. No pico da produção, a intensidade de carbono da Bitcoin se mostra extremamente elevada segundo o autor, chegando a 10.77kgCO₂/USD, o que excede a média de intensidade de carbono da atividade industrial na China. Este resultado é corroborado por Krause *et. al.* (2018), que fazem a comparação da intensidade carbono de quatro criptoativos e a extração mineral, sendo os gastos energéticos da Bitcoin mais intensivos do que as atividades mineradoras “Comparing the 2016 values, we find that Bitcoin and Monero consumed more energy per US\$ generated than copper, gold, PGMs and REOs.” (KRAUSE *et. al.*, 2018, p. 715).

Para além desse problema, Jiang *et. al.* (2021) ainda aponta que, no caso específico da Bitcoin, as regulações punitivas como taxaço de carbono não seriam tão efetivas. A regulação de entrada no mercado também não parece trazer benefícios, uma vez que mantém a lucratividade das atividades de mineração por mais tempo. No entanto a regulação de sítio traz os melhores resultados, cortando pela metade a intensidade de carbono se comparada com a situação referencial. Jiang *et. al.* (2021) então sugere que a realocação das atividades de mineração para regiões com matriz energética limpa seria a melhor política para a diminuição das emissões de carbono geradas pela atividade no país. Truby (2018), discute de modo amplo as melhores maneiras de se regular o mercado de *blockchain* sem interferir no desenvolvimento da tecnologia, mas incentivando uma mudança de comportamento em busca de um desenvolvimento mais sustentável, e afirma que políticas punitivas atrapalhariam o desenvolvimento da tecnologia. Embora Truby (2018) não faça as estimativas de cada cenário, ele sugere também medidas restritivas à eficiência dos maquinários e medidas que incentivem a mudança de protocolos de validação para protocolos menos dispendiosos. Quanto aos

²³ No original: “Pool regional statistics of BTC.com suggest a 58% versus 42% split between hydro-rich and coal-heavy regions in China” (STOLL, 2019, p. 1656)

cenários propostos por Truby (2018) e explorados por Jiang *et. al.* (2021), ambos os autores concordam que medidas punitivas não seriam eficazes quanto a resolução do problema ambiental apresentado.

Policies that induce changes in the energy consumption structure of the mining activities may be more effective than intuitive punitive measures in limiting the total amount of energy consumption and carbon emission in the Bitcoin blockchain operation (JIANG *et. al.*, 2021, p. 1942).

Esse cenário, no entanto, está longe de eliminar o problema, como aponta Vries (2019) em seu trabalho “Renewable energy will not solve bitcoin’s sustainability problem”. O autor defende que apesar da migração da indústria de mineração para regiões mais intensivas em hidroelétricas na China, esse tipo de energia ainda é muito suscetível a produções sazonais, tendo um pico de produção durante as chuvas e uma substancial queda na produção durante a seca. Essa sazonalidade, faz com que durante os períodos de seca a energia da região tenha que ser suprida em parte por matriz termoelétrica. A migração da indústria de mineração de Bitcoin para as áreas de hidroelétricas ainda causaria um aumento na demanda energética, que só poderia ser suprido no médio prazo pela construção de novas termoelétricas, o que se somado ao efeito sazonal das hidroelétricas aumenta substancialmente a emissão de carbono da atividade, mesmo realocada para uma região de energia mais limpa.

the carbon emission factor of purchased electricity in Sichuan ranges from 265 to 579 g CO₂/kWh, depending on the chosen method. This is more comparable to the GHG emissions of generating electricity from natural gas (469 g CO₂/kWh) than it is to the GHG emissions of generating hydroPOWER (4 g CO₂/kWh).

(VRIES, 2019, p. 896)

Além da intensidade carbono no mercado da Bitcoin, Vries (2019) evidencia o problema do lixo eletrônico gerado pela atividade, em geral se espera que o equipamento de mineração se torne obsoleto dentro de um ano e meio, o que estaria alinhado com a lei de Koomey e a observação que apenas as máquinas mais custo eficientes poderiam permanecer economicamente viáveis no mercado (VRIES, 2019, p. 896, tradução nossa)²⁴. Tal lei se

²⁴ No original: “we can expect mining equipment to become obsolete in roughly 1.5 years, which would follow from Koomey’s law and the observation that only the most cost-efficient machines can remain economically viable for mining” (VRIES, 2019, p. 896)

mostraria real na produção de maquinário específico para mineração, as chamadas *application-specific integrated circuit* (ASICs). O fato desses serem chips de propósito único e não customizáveis previne que sejam reutilizados para outras tarefas ou até para mineração em outro algoritmo de criptativo (VRIES *et. al.*, 2021, p. 3, tradução nossa)²⁵, em contraste com as CPU's e GPU's usadas no início da mineração de Bitcoin que podiam ser utilizadas em computadores para diversas funções, mas que seriam descartados uma vez que se tornassem obsoletos. Se levado em conta que a cada período de um ano e meio é necessário a mudança do equipamento de mineração para que a mesma continue economicamente viável, o autor estima que anualmente é gerado 10,948 toneladas métricas de lixo eletrônico pela rede Bitcoin. Quantidade comparável com o lixo eletrônico gerado por países como Luxemburgo (VRIES, 2019, p. 897, tradução nossa)²⁶.

Stoll (2021) e Vries (2019) exploram de forma mais detalhada o problema do lixo eletrônico gerado pela mineração da Bitcoin, chegando a números ainda mais alarmantes, totalizando 30.7 toneladas métricas de lixo por ano. Esse tipo de poluição continuaria independentemente da matriz elétrica adotada para a mineração de criptoativos. O que torna ainda mais preocupante é que, mesmo que alguns tipos de maquinários possam ser reutilizados em outras atividades, isso não é o caso para os maquinários mais eficientes, e mesmo que esse maquinário fosse reciclado, a reciclagem de lixo eletrônico muitas vezes é ineficiente, já que existem componentes que não podem ser reciclados. A reciclagem desse material se torna ainda mais improvável se posto em perspectiva a falta de leis e fiscalização nos países que as operações ocorrem.

China has historically housed most of the Bitcoin network but formally collects only 16% of all e-waste generated. Other destinations such as Iran, Kazakhstan, and Malaysia perform even worse. None of these countries has a comprehensive e-waste regulation. (VRIES *et. al.*, 2021, p. 3).

Em perspectiva essa estrutura de mercado se torna extremamente linear, se opondo diretamente aos princípios buscados pela economia circular, em específico os princípios de design de produtos propostos pelo C2C, uma vez que processadores do tipo ASIC são

²⁵ No original: “The fact that ASIC chips are single-purpose and not customizable prevents them from being repurposed for another task or even another type of cryptocurrency mining algorithm.” (VRIES *et. al.*, 2021, p. 3)

²⁶ No original: “This amount of e-waste is comparable to the total e-waste generated by a country like Luxembourg” (VRIES, 2019, p. 897)

projetados para durarem apenas um ano e meio e sem uso fora da mineração, tornando-os extremamente descartáveis e sem perspectiva de retorno ao processo produtivo.

A solução proposta vagamente por Vries (2019) no final de seu trabalho seria a mudança do protocolo de validação para o protocolo POS, o que diminuiria para níveis negligenciáveis as emissões de carbono geradas pela POW, além de atacar o problema do lixo eletrônico, uma vez que dentro do POS os agentes não competem em termos de poder de processamento para a criação de novos blocos.

Tabela. 5: Indicadores utilizados

INDICADORES UTILIZADOS	SIGNIFICADO
kgCO ₂	Quilogramas de Co ₂ , medida de emissão de Co ₂
MtCO ₂	Milhões de toneladas de Co ₂ , medida de emissão de Co ₂
Terahashes/segundo	Terahashes computados por segundo, medida de poder computacional
TWh	Terawatts por hora, medida de uso de energia
GH/s	Gigahash por segundo, medida de poder computacional
CO ₂ /USD	Co ₂ emitido por dólar gerado, medida de intensidade carbono da produção
t/ano	Toneladas de lixo por ano, medida de produção de dejetos
Obsolescência média	Medida de tempo de vida média do capital utilizado

Fonte: elaboração do autor.

5.3 Desafios da mudança de protocolo de validação

A validação POS surge como uma maneira de combater os gastos de eletricidade gerados na validação POW, assim como uma possível centralização do mercado gerada pela economia de escala promovida nas redes POW. Diferentemente do POW, a validação POS não promove uma competição computacional para a solução da função *hash* associada a cada bloco de informações. Em vez disso, o validador do bloco é escolhido de forma semialeatória. O

processo é feito da seguinte maneira: [1] Validadores depositam certa quantidade de seus ativos em uma reserva para terem a chance de serem escolhidos para validar o próximo bloco; [2] a rede *blockchain* escolhe um validador levando em conta um algoritmo de aleatoriedade assim como a quantidade de ativos depositadas por cada um; [3] o validador então faz a computação validando o novo bloco; [4] o bloco passa por um processo de checagem com base nos blocos anteriores, garantindo a veracidade do bloco; [5] o bloco então é distribuído para todos os agentes na rede.

Nesse modelo o poder computacional para a criação de um novo bloco é minimizado, uma vez que apenas um dos agentes na rede necessita fazer esse trabalho de cada vez. O problema computacional necessário para a validação do bloco pode, assim, ser facilitado, demandando consideravelmente menos energia e podendo ser feito por computadores pessoais e até por celulares. Isso gera uma maior descentralização da rede, uma vez que o preço de entrada para um validador não incorre em compra de material específico para mineração afim de se tornar competitivo, mas sim de criptoativos dentro da rede. Porém esse sistema pode incorrer em um problema quanto ao consenso na rede, uma vez que a estrutura de incentivos dita o comportamento do validador, que pode por sua vez escolher validar um bloco que seja de interesse pessoal e não necessariamente o correto.

O modo de validação POS internaliza o custo de oportunidade da produção de novos blocos, trazendo para dentro do sistema o investimento necessário para essa validação na forma do depósito que o agente deve fazer. Esse processo se torna perigoso uma vez que um criptoativo de menor valor de mercado pode ser facilmente centralizado nas mãos de um agente específico tornando um ataque majoritário à rede um perigo real. O ataque majoritário ocorre quando um agente tem a maioria do poder decisório na rede, podendo assim alterar blocos antigos e reescrever o histórico dos dados em benefício próprio, tornando a rede em um sistema não confiável. No caso do POS, os custos para esse ataque são traduzidos para a metade do valor real de toda rede, em contraponto aos custos no POW que são expressos no valor do maquinário e eletricidade que levariam a um agente possuir metade do poder computacional da rede.

Além disso a rede POS incorre no risco de cair no problema de *Nothing-at-Stake*, onde ao ser dada uma escolha entre os blocos para serem validados os incentivos para o agente escolher validar dois blocos é maior do que os de contar uma única história sobre a rede. Quanto

ao problema de *Nothing-at-Stake*, Saleh (2018) defende que ao se internalizar o preço do criptoativo ao problema, o POS pode chegar ao consenso. Dado um número de usuários razoável na rede, o preço do criptoativo também pode garantir que o ataque majoritário seja não factível, uma vez que o valor da rede afeta diretamente os custos de se fazer tal ataque. “This paper demonstrates that appending blocks to all branches imposes a cost upon an agent by reducing the value of blockchain coins” (SALEH, 2018, p. 9).

O modelo POS, então resolve o problema de consumo energético da *blockchain*, porém impõe a ela limitações, principalmente de tamanho e modelo dos incentivos, para atingir o consenso, e por isso recebe certa resistência dos criadores de sistemas de *blockchain*, quanto a sua real utilidade para criar sistemas descentralizados que garantem consenso entre agentes anônimos. Esse meio de validação deve ser visto, portanto, de maneira crítica quanto a sua real utilidade na hora de se criar redes para além de aplicação financeira, uma vez que essas aplicações podem não estar interessadas em serem utilizadas por uma vasta base de usuários ou de implementar os sistemas de incentivo monetários adequados para garantir consenso dentro de suas redes.

6- Conclusão

O resultado da análise da literatura sobre os danos da *blockchain* aponta uma convergência dos autores quanto a preocupação com as emissões de carbono geradas pela atividade, outros temas como o lixo eletrônico gerado pela atividade são explorados, mas ainda tem espaço para realizar-se mais pesquisas no campo. Os autores divergem em métodos de análise e estimação dos impactos, o que ocasiona em estimativas bem abrangentes do real escopo. Isso se dá pela dificuldade de obtenção de dados precisos sobre a tecnologia. As soluções propostas pelos autores para resolução do problema também abrangem uma gama de medidas, mas de modo geral acredita-se que a mudança de protocolo de validação das aplicações de *blockchain*, assim como a mudança da matriz energética utilizada, sejam as melhores formas de diminuir os danos causados.

Quanto a suas aplicações em benefício do meio ambiente, a literatura analisada aponta um forte potencial da *blockchain* para a melhora de eficiência nas cadeias produtivas circulares. Suas características únicas de rastreabilidade, imutabilidade, transparência e descentralização garantem robustez e confiança no sistema de armazenamento de dados, o que por sua vez se torna vantajoso para tomada de decisão dos agentes na economia circular. Os trabalhos nesse sentido colaboram para o desenvolvimento de estruturas que integram a tecnologia a usos práticos, mesmo que sua utilização prática ainda esteja em nível experimental. Algumas críticas são postas, como a veracidade dos dados gravados na rede, o tipo de protocolo de validação e o tipo de rede utilizada, seja ela pública ou privada. Essas críticas parecem ser mais bem solucionadas com a integração da *blockchain* e outras tecnologias da indústria 4.0.

Os resultados também apontam algumas áreas onde a pesquisa pode ser expandida. Os dilemas de implementação da tecnologia para circularização das cadeias produtivas e o protocolo de validação utilizado são pouco explorados e trazem questões como: A utilização ampla da *blockchain* pode acabar fomentando a lógica linear de consumo caso seja feita através do POW, devido a seu grande gasto energético e intensidade em capital pouco circular? Como regular o uso desse protocolo de validação para diminuir os impactos ambientais? A utilização de POW de maneira ampla poderia gerar uma escassez de minérios raros? Como monitorar os empreendimentos na área financeira que utilizam POW dado a natureza anônima da atividade mineradora? Além dessas questões também podem ser levantadas questões que explorem a sustentabilidade de maneira mais ampla, abrangendo a capacidade de implementação tecnológica divergente entre países do norte e do sul global, o impacto no mercado de trabalho que a automatização da produção pode causar e o escopo real da transparência que redes privadas de *blockchain* teriam. A discussão entre as diferentes matrizes energéticas utilizadas também pode ser expandida, de modo a explorar os dilemas da utilização de fontes renováveis que são sensíveis a mudanças climáticas e sazonais contra a utilização de fontes não renováveis que oferecem mais estabilidade na produção a um maior custo ambiental. Esses questionamentos servem como incentivo para futuras pesquisas na área.

O desenvolvimento da tecnologia *blockchain* como ferramenta de redução de impactos no meio ambiente ainda está em seu estágio inicial, assim como a tecnologia em si. Apesar dos claros desafios, há também grande potencial na sua utilização. Deve existir, por tanto um olhar atento, tanto de pesquisadores quanto dos agentes que implementarem a tecnologia na sua

evolução, afim de avaliar soluções eficientes para resolução tanto dos dilemas internos advindos do seu gasto energético, quanto para seus desafios de implementação nas cadeias produtivas circulares.

7- Bibliografia

ANASTAS, P. T.; ZIMMERMAN, J. B. Peer reviewed: Design through the 12 principles of green engineering. **Environmental science & technology**, v. 37, n. 5, p. 94A-101A, 2003.

BEKRAR, A. et al. Digitalizing the closing-of-the-loop for supply chains: A transportation and blockchain perspective. **Sustainability**, v. 13, n. 5, p. 2895, 2021.

BÖCKEL, A.; NUZUM, A.-K.; WEISSBROD, I. Blockchain for the circular economy: Analysis of the research-practice gap. **Sustainable production and consumption**, v. 25, p. 525–539, 2021.

BOULDING, K.E. (1966). **The Economics of the Coming Spaceship Earth**. Jarrett, H. (Ed.) Environmental Quality in a Growing (pp. 3-14). Baltimore, MD: Resources for the Future/Johns Hopkins University Press.

Btc.com pool. Disponível em: <<https://pool.btc.com/pool-stats>>. Acesso em: 29 jul. 2022.

CAGNO, E. et al. The role of Digital Technologies in operationalizing the Circular Economy transition: A systematic literature review. **Applied sciences (Basel, Switzerland)**, v. 11, n. 8, p. 3328, 2021.

CENTOBELLI, P. et al. Blockchain technology for bridging trust, traceability and transparency in circular supply chain. **Information & management**, v. 59, n. 7, p. 103508, 2022.

DANTAS, T. E. T. et al. How the combination of Circular Economy and Industry 4.0 can contribute towards achieving the Sustainable Development Goals. **Sustainable production and consumption**, v. 26, p. 213–227, 2021.

Digiconomist. Disponível em: <<https://digiconomist.net>>. Acesso em: 29 jul. 2022.

ESMAEILIAN, B. et al. Blockchain for the future of sustainable supply chain management in Industry 4.0. **Resources, conservation, and recycling**, v. 163, n. 105064, p. 105064, 2020.

GIAMPIETRO, M. On the circular bioeconomy and decoupling: Implications for sustainable growth. **Ecological economics: the journal of the International Society for Ecological Economics**, v. 162, p. 143–156, 2019.

GREVE, Fabíola, et al. **Blockchain e a Revolução do Consenso sob Demanda**. Minicursos do XXXVI do Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos (SBRC), São Carlos-SP. 2018. 52 p.

hash-rate. Disponível em: <<https://www.blockchain.com/pt/charts/hash-rate>>. Acesso em: 29 jul. 2022.

HAYES, A. A cost of production model for bitcoin. **SSRN Electronic Journal**, 2015.

HROUGA, M.; SBIHI, A.; CHAVALLARD, M. The potentials of combining Blockchain technology and Internet of Things for digital reverse supply chain: A case study. **Journal of cleaner production**, v. 337, n. 130609, p. 130609, 2022.

JIANG, S. et al. Policy assessments for the carbon emission flows and sustainability of Bitcoin blockchain operation in China. **Nature communications**, v. 12, n. 1, p. 1938, 2021.

KÖHLER, S.; PIZZOL, M. Life Cycle Assessment of Bitcoin mining. **Environmental science & technology**, v. 53, n. 23, p. 13598–13606, 2019.

KOUHIZADEH, M.; SARKIS, J.; ZHU, Q. At the nexus of blockchain technology, the circular economy, and product deletion. **Applied sciences (Basel, Switzerland)**, v. 9, n. 8, p. 1712, 2019.

KRAUSE, M. J.; TOLAYMAT, T. Quantification of energy and carbon costs for mining cryptocurrencies. **Nature sustainability**, v. 1, n. 11, p. 711–718, 2018.

MASANET, E. et al. Implausible projections overestimate near-term Bitcoin CO₂ emissions. **Nature climate change**, v. 9, n. 9, p. 653–654, 2019.

MCDONOUGH, W. et al. Peer reviewed: Applying the principles of green engineering to cradle-to-cradle design. **Environmental science & technology**, v. 37, n. 23, p. 434A-441A, 2003.

MORA, C. et al. Bitcoin emissions alone could push global warming above 2°C. **Nature climate change**, v. 8, n. 11, p. 931–933, 2018.

NANDI, S. et al. Redesigning supply chains using blockchain-enabled circular economy and COVID-19 experiences. **Sustainable production and consumption**, v. 27, p. 10–22, 2021.

NARAYANAN, A. et al. **Bitcoin and cryptocurrency technologies: A comprehensive introduction**. Princeton, NJ, USA: Princeton University Press, 2016.

PAIVA SOBRINHO, R. et al. Tecnologia Blockchain: inovação em Pagamentos por Serviços Ambientais. **Estudos Avançados**, v. 33, n. 95, p. 151–176, 2019.

SALEH, F. Blockchain without waste: Proof-of-stake. **SSRN Electronic Journal**, 2018.

SCHINCKUS, C. Proof-of-work based blockchain technology and Anthropocene: An undermined situation? **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 152, n. 111682, p. 111682, 2021.

STOLL, C.; KLAASSEN, L.; GALLERSDÖRFER, U. The carbon footprint of bitcoin. **Joule**, v. 3, n. 7, p. 1647–1661, 2019.

TOMLINSON, B. et al. Analyzing the sustainability of 28 ‘Blockchain for Good’ projects via affordances and constraints. **Information technology for development**, v. 27, n. 3, p. 439–469, 2021.

TRUBY, J. Decarbonizing Bitcoin: Law and policy choices for reducing the energy consumption of Blockchain technologies and digital currencies. **Energy research & social science**, v. 44, p. 399–410, 2018.

TRUBY, J. et al. Blockchain, climate damage, and death: Policy interventions to reduce the carbon emissions, mortality, and net-zero implications of non-fungible tokens and Bitcoin. **Energy research & social science**, v. 88, n. 102499, p. 102499, 2022.

UPADHYAY, A. et al. Blockchain technology and the circular economy: Implications for sustainability and social responsibility. **Journal of cleaner production**, v. 293, n. 126130, p. 126130, 2021.

VRIES, A. Renewable energy will not solve bitcoin’s sustainability problem. **Joule**, v. 3, n. 4, p. 893–898, 2019.

VRIES, A.; STOLL, C. Bitcoin’s growing e-waste problem. **Resources, conservation, and recycling**, v. 175, n. 105901, p. 105901, 2021.