

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
FACULDADE DE ECONOMIA
GRADUAÇÃO EM ECONOMIA**

Ricardo Garcias Lage Duarte

Mineração de criptomoedas: consumo de energia e meio ambiente.

**JUIZ DE FORA
2023**

Ricardo Garcias Lage Duarte

Mineração de criptomoedas: consumo de energia e meio ambiente.

Trabalho de conclusão de curso apresentado para a Faculdade de Economia da Universidade Federal de Juiz de Fora com o objetivo parcial à obtenção do grau de bacharel em Economia.

Orientador: Prof. Dr. Weslem Rodrigues Faria

JUIZ DE FORA

2023

Ficha catalográfica elaborada através do programa de geração automática da Biblioteca Universitária da UFJF, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Duarte, Ricardo Garcias Lage .

Mineração de criptomoedas: consumo de energia e meio ambiente. / Ricardo Garcias Lage Duarte. -- 2023.

32 p.

Orientador: Weslem Rodrigues Faria

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Economia, 2023.

1. Criptomoedas. 2. Meio Ambiente. 3. Consumo de Energia. 4. Mineração de Criptomoedas. I. Faria, Weslem Rodrigues, orient. II. Título.



UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
REITORIA - FACECON - Depto. de Economia

FACULDADE DE ECONOMIA / UFJF

ATA DE APROVAÇÃO DE MONOGRAFIA II (MONO B)

Na data de 08/12/2023, a Banca Examinadora, composta pelos professores

1 – Weslem Rodrigues Faria - orientador; e

2 – Admir Antonio Betarelli Junior,

reuniu-se para avaliar a monografia do acadêmico Ricardo Garcias Lage Duarte, intitulada: Mineração de criptomoedas: consumo de energia e meio ambiente.

Após primeira avaliação, resolveu a Banca sugerir alterações ao texto apresentado, conforme relatório sintetizado pelo orientador. A Banca, delegando ao orientador a observância das alterações propostas, resolveu APROVAR a referida monografia.



Documento assinado eletronicamente por **Weslem Rodrigues Faria, Professor(a)**, em 13/12/2023, às 10:10, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Admir Antonio Betarelli Junior, Professor(a)**, em 13/12/2023, às 10:52, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no Portal do SEI-Ufjf (www2.ufjf.br/SEI) através do ícone Conferência de Documentos, informando o código verificador **1619875** e o código CRC **D5BCF7F5**.

RESUMO

Este trabalho pretende apresentar uma relação entre o processo de transações de criptomoedas e a emissão de gases de efeito estufa, que advém do processo realizado através da tecnologia blockchain, que se utiliza de uma função conhecida como “Proof of Work” para garantir a segurança entre as transações de blocos de criptomoedas. Contudo, o processo demanda um poder computacional significativo e um tempo elevado para processar. Assim, os mineradores trabalham com numerosas máquinas computacionais na tentativa de garantir o maior número de gerações bem sucedidas, e com isso receber uma recompensa em criptomoeda recém-criada. A partir desse processo de validação que se pode verificar que a atividade demanda um consumo elevado de energia e com isto, esse trabalho se utilizará de uma metodologia de revisão da literatura existente, com o objetivo de relacionar os processos de mineração de criptomoedas com a emissão de gases poluentes, usando as bases energéticas de cada um dos 3 países principais, onde mesmo os Estados Unidos tendo uma maior presença na mineração, a China ainda apresenta maior impacto ambiental dado ao intensivo uso de carvão, em contraste ao uso de gás natural por parte dos americanos, juntamente com uma explicação do processo de mineração de cripto ativos.

Palavras-chave: Criptomoedas. Meio Ambiente. Demonstração de Dados. Consumo de Energia. Mineração de Criptomoedas.

ABSTRACT

This work aims to present a relationship between the cryptocurrency transaction process and the emission of greenhouse gases, which stems from the process carried out through blockchain technology, which uses a function known as "Proof of Work" to ensure security between cryptocurrency block transactions. However, the process requires significant computational power and a lengthy processing time. Thus, miners work with numerous computational machines in an attempt to ensure the highest number of successful generations, thereby receiving a reward in newly created cryptocurrency. Through this validation process, it can be observed that the activity demands a high energy consumption. Therefore, this work will employ a literature review methodology with the objective of relating cryptocurrency mining processes to the emission of polluting gases, using the energy bases of each of the three main countries, along with an explanation of the process of mining crypto assets.

Keywords: Cryptocurrencies. Environment. Data Demonstration. Energy Consumption. Cryptocurrency Mining.

SUMÁRIO

1 - INTRODUÇÃO.....	4
2 - CRIPTOMOEDA, CONSUMO DE ENERGIA E EMISSÕES.....	6
2.1 USO DE ENERGIA.....	12
3 - ANÁLISE ENERGÉTICA E DE MINERAÇÃO DE CRIPTOMOEDAS.....	17
4 - CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	23
5 - REFERÊNCIAS.....	25

1 INTRODUÇÃO

Após a crise de 2008 e a desconfiança generalizada frente aos bancos tradicionais, instituições internacionais e ao sistema monetário controlado pelo Estado, surge a ideia de se desenvolver uma moeda “livre”, descentralizada, sem lastro em ativos, digital e desregulada, então chamadas de criptomoedas. Com esse ideal em mente, Satoshi Nakamoto, um pseudônimo, lança em 2009, a primeira moeda digital, intitulada como Bitcoin (He *et al.* 2016).

A partir disso, se registram mais de 9 mil moedas digitais disponíveis para transações e mais de 16 mil já foram criadas ao longo do tempo, desenvolvendo assim um mercado avaliado em mais de U\$\$ 2 trilhões em julho de 2021 (FMI¹, 2021), e a partir do início da pandemia de COVID-19 o interesse privado por investimentos mais arriscados, principalmente pelos mais jovens, cresceu exponencialmente, uma vez que a necessidade de distanciamento social e a redução do uso de dinheiro físico, estimulou um maior fluxo de capital em artigos de alta rentabilidade e alto risco (FCA², 2022), o que contribuiu para uma elevação na procura por criptomoedas como fonte de investimento e até mesmo como forma de transação em compras online.

Contudo, a ausência de um órgão capaz de registrar essas transações, cria um mercado a parte responsável pela validação e registro dessas transações, as blockchains, assim chamadas as carteiras de transação, onde mineradores trabalham como “validadores” para concluir as transações envolvendo criptomoedas. Com isso, inúmeras pessoas de forma autônoma e independente desenvolvem um sistema de quebra-cabeças, o “*proof of work*”, para assegurar as transações e garantir a segurança delas, e esse trabalho é recompensado com um valor em criptomoeda recém cunhada durante o processo (Alex de Vries, 2018). Entretanto, para conseguir validar a quantidade de transações realizadas, a demanda por ferramentas e computadores potentes, além de um elevado consumo de energia têm apontado a participação das criptomoedas frente ao aumento das emissões de carbono e ao aquecimento global. E essa atividade tem demonstrado ser de difícil controle e tende a migrar de região em região a partir de melhores condições de funcionamento, baixo custo de energia e baixa regulação ambiental

¹Fundo Monetário Internacional

²Financial Conduct Authority

como apresentado pela Analisa R. Bala (2021), a mineração já é vista como um fenômeno que sem tendência de redução das atividades, em vista que, à medida que os valores e o volume de transações aumentam, e conseqüentemente a sua rentabilidade, a ideia de um “dinheiro fácil” tem atraído cada vez mais pessoas para esse processo.

Segundo o Cambridge Bitcoin Electricity Consumption Index (2021), os três principais países em volume de transações realizadas por mineradores são: Estados Unidos, China e Cazaquistão, que juntos representam cerca de 72,17% do total de hashes³ gerados no ano de 2021, o qual se utiliza do IP (*Internet Protocol*) das máquinas de mineração para assim identificar de qual região os hashes são gerados e em quais proporções.

A partir disso, objetiva-se através da análise de uma revisão de trabalhos acerca do processo de mineração e validação das transações de criptomoedas e da matriz energética principal de cada um dos países selecionados para este trabalho, explicitar em como o processo de mineração pode ser considerado de grande impacto ambiental, e com base em trabalhos e informações estatísticas que avaliaram como as criptomoedas, mesmo sendo produtos 100% digitais, demandam um alto consumo de energia para o seu funcionamento, além disso, intenciona-se apontar como a tecnologia de geração renovável não é capaz de suprir a demanda de energia da sociedade de maneira eficiente e barata, e assim reforçando a dependente dos combustíveis fósseis, comprometendo a eficácia das novas tecnologias digitais.

³ Uma função de hash criptográfico, muitas vezes é conhecida simplesmente como hash – é um algoritmo matemático que transforma qualquer bloco de dados em uma série de caracteres de comprimento (Kaspersky, 2014)

2 CRIPTOMOEDA, CONSUMO DE ENERGIA E EMISSÕES

A princípio a definição de criptomoeda vem de moedas digitais privadas que são criadas e disponibilizadas de maneira completamente descentralizada através de uma rede de computadores e validadas por criptografia a partir da tecnologia Blockchain, tal definição se diferencia do conceito de moeda eletrônica, que é apenas a representação digital da moeda tradicional emitida pela autoridade monetária do país. Como a criptomoeda não é denominada na moeda oficial do país e até usa sistema de registros eletrônicos, mas não centralizado em alguma instituição financeira. (RAGAZZO; CATALDO; 2021)

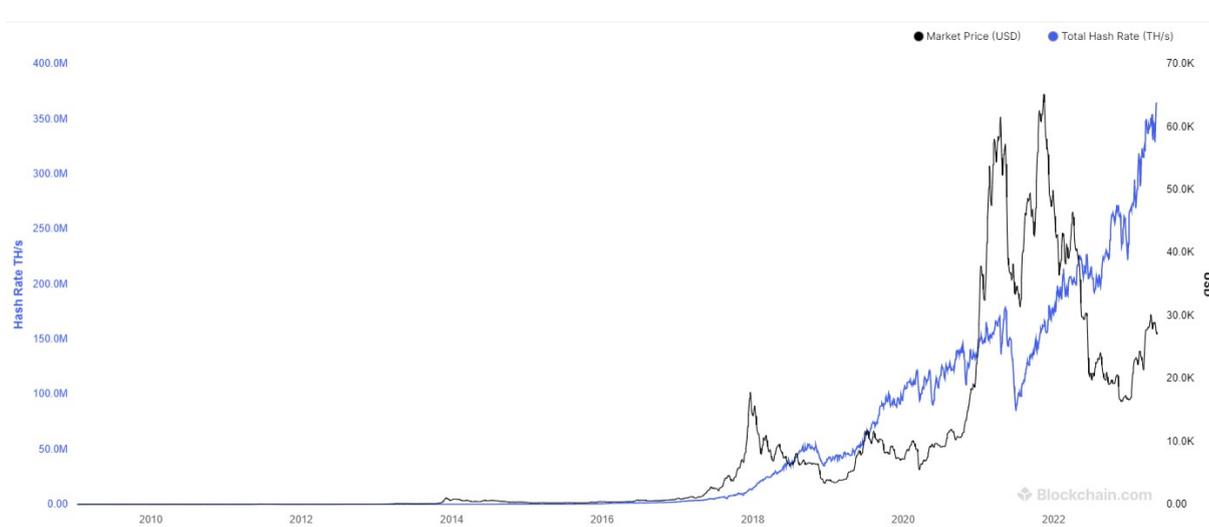
O valor movimentado dentro do mercado de cripto ativos em 2021 atingiu o total de 3 trilhões de dólares em valor de mercado antes de um recuo, ainda em 2021, para 2 trilhões (FMI, 2021), e países emergentes se destacam frente ao aumento das transações correntes desses artigos. E, a partir de 2020, os valores de negociação do Bitcoin e Ether¹ subiram de maneira avassaladora, batendo números até então inesperados (FMI, 2022), e como consequência, a atividade de mineração ganhou novos caminhos, uma vez que com o aumento das transações surgiu a necessidade cada vez maior do cálculo de funções de hashes e com isso cresce a quantidade de indivíduos atuando em função de validar essas transações.

Mesmo com o crescimento da procura e o interesse privado constante e cada vez maior em se adquirir criptomoedas e muitas vezes assumirem ela como uma reserva de valor, as criptomoedas ainda se mantêm em caráter mais especulativo que propriamente monetário, como meio de troca. A maioria dos Bancos Centrais ainda considera o uso de criptomoedas para transações um mercado único, isso se deve, dentre outros motivos, às dificuldades de escalabilidade associadas a um grande número de transações terminando na fila de espera de confirmação e à grande volatilidade que faz com que seja considerado complicado usar uma criptomoeda para fazer pagamentos simples do dia a dia, dado que se teria alterações de preços diárias pela alta volatilidade. (Boar, C; Wehrli, A; Kumar, A; Smith, C 2022).

1 O Ethereum é uma plataforma descentralizada focada na execução dos chamados “contratos inteligentes”: operações que são feitas automaticamente quando certas condições são cumpridas. Conta com sua própria moeda digital, o Ether.

2 Uma função hash é um algoritmo que mapeia dados de comprimento variável para dados de comprimento fixo. Os valores retornados por uma função hash são chamados valores hash ou códigos hash

Gráfico 1 - Valor de mercado do Bitcoin em dólar americano comparativamente com a quantidade total de Hashes gerados (2010-2023)



Fonte: Blockchain, 2023.

De acordo com Pontin e Duarte Junior (2018, p. 13):

“Pode-se caracterizar a soberania econômica nacional como o poder ou a capacidade que um Estado tem de controlar, de forma independente e autônoma, seus recursos econômicos, sem nenhuma interferência externa.” Assim, a capacidade de um país de poder controlar de maneira autônoma sua política monetária e o controle de emissão, juros e mecanismos de controle inflacionário se mostra de extrema importância para a manutenção de estáveis indicadores macroeconômicos.”

Um ponto importante acerca do Bitcoin e outras criptomoedas que atuam com essa ferramenta, a digital scarcity (escassez digital), presente no b-money, criado pelo cientista da computação Wei Dai, e no Bit gold, de Nick Szabo. A escassez digital parte da ideia de uma redução gradativa da replicação do dinheiro virtual. Uma vez que a moeda cibernética é emitida por seu próprio algoritmo, reduzir essa escala de multiplicação pode ajudar a frear sensivelmente a inflação dessa espécie de dinheiro. (DAI, Wei; SZABO, Nick; 2005)

Neste cenário, enquanto o poder de emitir dinheiro fiduciário compete aos governos, que controlam a economia a partir da impressão de papel-moeda, aumentando ou diminuindo a escala de produção a depender de seus objetivos, na escassez digital, cada vez menos moeda será emitida. Assim, em tese, o processo de perda do poder de compra (inflação) com esse dinheiro é, a cada dia, mais diminuto, sendo possível se falar em deflação desse mercado. (Pontin e Duarte Junior, 2018).

A partir dessa ideia da escassez digital do Bitcoin, a criptomoeda foi programada para interromper a geração de recompensas oriundas do processo de mineração quando 21.000.000 de Bitcoins forem emitidos. Este processo se dará de forma gradativa: a cada 210.000 blocos (que contêm agrupamentos de Bitcoins) minerados, a recompensa da *Proof of Work* entregue aos mineradores cai pela metade (processo de *halving*). (DE VREIS, Alex, 2022).

Estima-se que cada *halving* ocorra em média a cada quatro anos, tendo sido o último em maio de 2020, quando a recompensa para cada bloco minerado caiu de 12,5 para 6,25 Bitcoins.

Tendo como base o funcionamento descentralizado da criptomoedas, Nakamoto³ propôs como solução para o processo de dupla emissão, dado que o Bitcoin é um produto digital, seria fácil de ser sucessivamente duplicado, inflacionando o mercado da moeda e conseqüentemente destruindo o seu valor, comprometendo a confiabilidade no produto. A partir disso foi desenvolvido a ideia de que cada transação teria o seu registro de data e hora feito por um hash, e deve ser obtido através do "*proof of work*", onde se encontra o valor do hash que satisfaça o bloco em transação. (DE VREIS, Alex, 2022).

Satisfeito essa condição o bloco é transmitido para a rede e outro bloco é criado a partir do hash aceito. O localizador do bloco é recompensado com um total de 12,5 moedas recém-cunhadas, um valor que é reduzido pela metade a cada 4 anos e sobre essa recompensa fixa, recebem uma porcentagem de taxas de transação, tendo essa atividade um retorno bem expressivo dado o valor total das criptomoedas no mercado e a capacidade de se fechar vários blocos em um único dia.

³ Satoshi Nakamoto, um pseudônimo, criador do Bitcoin.

Quanto maior for o poder computacional e o gasto de energia maiores serão as taxas de sucesso e para manter as taxas de recompensa estáveis, a rede ajusta a complexidade dos hash de maneira com que novos blocos sejam criados a cada 10 minutos. Daí a comparação com a mineração, uma vez que se gera uma nova moeda no processo de conclusão de um bloco e é essa moeda que, como em um garimpo de ouro, vários indivíduos demandam capacidade computacional cada vez mais elevadas e um extenso consumo de energia.

Dado o crescente aumento no valor das criptomoedas a partir de 2020, e onde atingiu o seu pico de maior valor em 2021 (Gráfico 1), se inicia o debate sobre como o processo de mineração tem impactado no consumo de energia. Não sendo possível mensurar o nível de processamento diretamente, é possível apontar a partir da quantidade de hash calculados por segundo, onde em maio de 2023 foi calculado um total de 365 milhões de hash por segundo ininterruptamente (Blockchain, 2023).

A discussão sobre o impacto da mineração de criptomoedas ganhou relevância após a explosão do Bitcoin em meados de 2019 e 2020, onde se popularizou como um importante meio de investimento e um sonho futuro de uma moeda livre e descentralizada, contudo, o processo de mineração se mostra extremamente poluente dado que o alto consumo de energia da atividade. Tendo em vista a urgência da comunidade internacional em discutir questões de sustentabilidade e economia verde, a expansão do mercado de criptomoedas se coloca na contramão das tentativas de redução das emissões de carbono.

Com base nas discussões apresentadas por Alex de Vries, pesquisador na Escola de Negócios e Economia da Vrije Universiteit Amsterdam, aponta que:

“A crescente atenção aos riscos climáticos e às emissões de carbono tem desencadeado um debate sobre as fontes de eletricidade utilizadas para minerar Bitcoin. Estimativas provenientes da Cambridge Centre for Alternative Finance - CCAF apontam que em 2021 a participação de fontes renováveis de energia na mineração varia de 39% a mais de 58% (de acordo com uma iniciativa do setor chamada Bitcoin Mining Council)”. (DE VREIS, Alex, 2022).

Em maio de 2021, aproximadamente 2,9 milhões de dispositivos especializados em hardware competiram no processo de mineração, gerando 160 quintilhões de tentativas por segundo e consumindo aproximadamente 13 gigawatt (GW) de eletricidade, como apresentado por Hall, M. (2021). E o impacto desse consumo de energia no meio ambiente pode ser estimado a partir da matriz energética majoritária do país no qual ocorre maior concentração de mineradores ativos, que por sua vez, é analisado através da coleta de IPs dos mineradores a partir de quatro grupos de mineração: BTC.com, Poolin, ViaBTC e Foundry USA. Os quais juntos, representam 44% da atividade total de mineração de Bitcoin até outubro de 2021. (Cambridge Bitcoin Electricity Consumption Index - CBECI, 2021). Estes grupos de mineração combinam o poder computacional dos dispositivos conectados, e ao ingressar e com isso, compartilhar recompensas, os mineradores podem estabilizar sua receita, o que no processo, eles revelam seu endereço de IP, que pode ser usado para determinar sua localização.

A partir disso, conseguindo localizar a origem dos mineradores, é possível, a partir da análise da geração de energia local, determinar se a atividade é emissora de gases de efeito estufa ou não.

Outro ponto apresentado pela Lena Klaußen, da CCRI Crypto Carbon Ratings Institute, Alemanha, aponta que dada a ação agressiva chinesa contra a mineração do Bitcoin, chegando em 2021 a banir totalmente a moeda do país, estima-se que a participação de energias renováveis no processo tenha saído de uma média de 41,6% em 2020 para 25,1% em agosto de 2021. Isso porque, com o êxodo dos mineradores da China, que representava mais da metade de toda a rede, para países como Mongólia, Cazaquistão e Irã, além de estímulos de governadores americanos para a realização das atividades dentro dos Estados Unidos, os mineradores migraram do uso da energia hidrelétrica das províncias de Sichuan e Yunnan para aproveitar da geração de energia hídrica durante o período das Monções, e passaram a utilizar de fontes de energia provenientes do carvão e petróleo das usinas no Cazaquistão a exemplo. Portanto, a intensidade média de carbono derivada da eletricidade consumida pela rede do Bitcoin pode ter aumentado de 478,27 gCO₂/kWh em média em 2020 para 557,76 gCO₂/kWh em agosto de 2021. (Finansinspektionen, 2021).

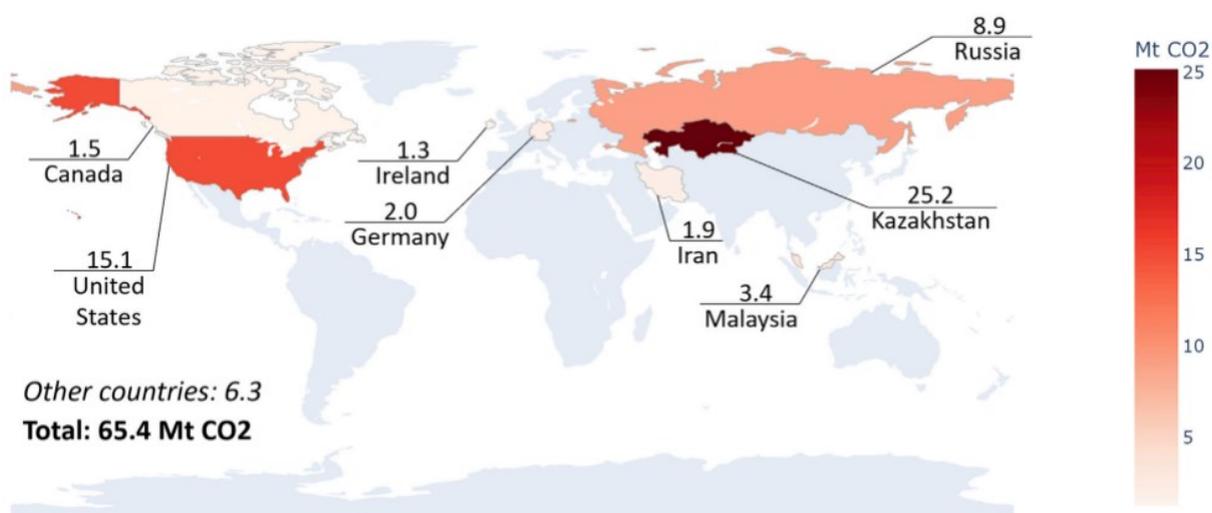
Esses mineradores não precisam apenas de energia barata, mas de uma fonte estável de energia porque suas máquinas precisam funcionar 24 horas por dia, 7 dias por semana, e as fontes de combustível fóssil são as mais adequadas para isso... Os mineradores já estão revivendo usinas de fósseis e minas de carvão inativas em lugares como Nova York e Montana. (VRIES, data desconhecida).

Outro artigo utilizado para a elaboração das definições apresentadas neste trabalho é do Muhammad Mahbubur Rashid e Mohammed Ataur Rahman (2022) o qual também aponta a problemática em torno da mineração além de apresentar modelos de validação com menor ponto de consumo energético como caminho para reduzir o alto consumo como por exemplo o *Proof-of-Stake* (PoS) e o *Delegated Proof-of-Stake* (DPoS) os quais se mostram menos demandantes de energia e atividade processual quando comparados ao tradicional *Proof Of Work* apontando caminhos para se seguir na tentativa de fazer o processo mais limpo e menos agressivo ao meio ambiente.

Baseado na emissão estimada (557,76 gCO₂/kWh) e na demanda de energia estimada pela mineração de 13,39 GW em agosto de 2021 (CBECI) é possível estimar que ao todo o bitcoin emitiu 65,4 megatoneladas de CO₂ (MtCO₂) por ano.(DE VREIS, Alex, 2021). O que corresponde às emissões de um país como a Grécia (56,6 MtCO₂ em 2019) e representa 0,19% das emissões globais, para uma única atividade de investimento.

Contudo, dado que as bases de pesquisa da CBECI abrange apenas 44% da mineração total realizada, existe a incerteza referente a real taxa de emissões do Bitcoin, porém eventos como o apagão da internet no Cazaquistão (2021) e a repressão chinesa ao Bitcoin (2021) geram bases empíricas para a confiabilidade das estimativas rede de mineradores. A exemplo, depois da repressão, no início de julho, a taxa de hash de toda a rede do Bitcoin havia diminuído em 45% em comparação com maio de 2021, e os dados da CBECI apontavam que cerca de 44% da geração de hashes era proveniente da China, isso pode ser um enfoque que os dados provenientes dos IPs dos mineradores garante uma aproximação fidedigna da localização e conseqüentemente da emissão de carbono pelos mineradores. (Klaaßen, L., and Stoll, C. (2021).

Gráfico 2 - Pegada global de carbono estimada da rede do Bitcoin, até agosto de 2021.



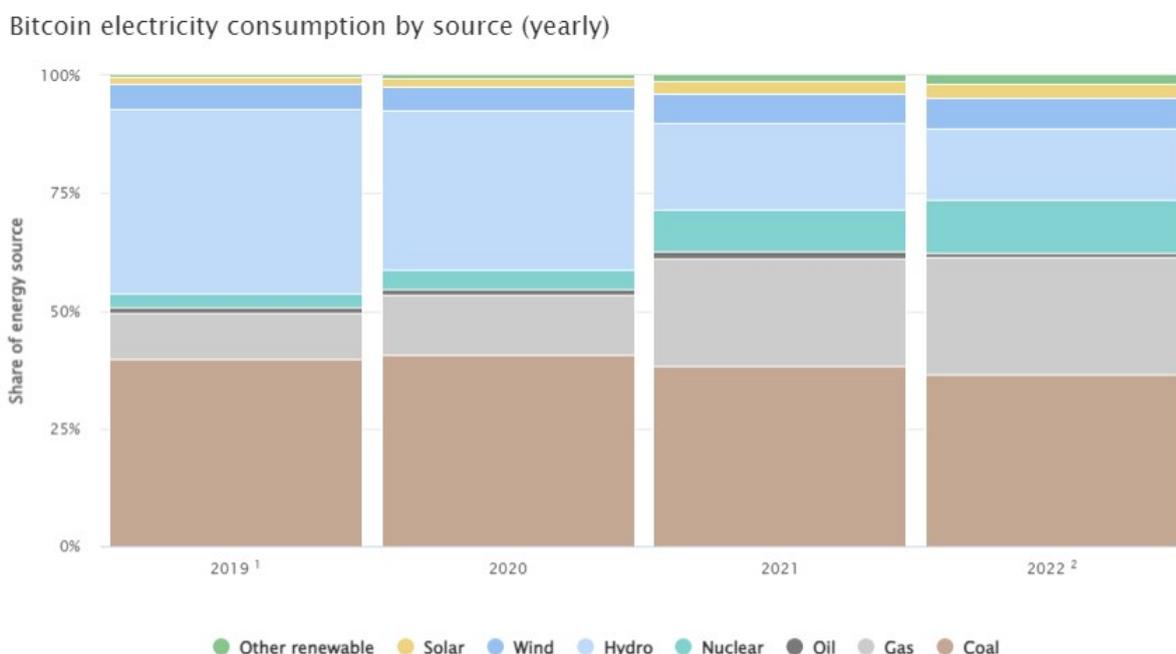
Fonte: Klaaßen, L., and Stoll, C. (2021).

2.1 USO DE ENERGIA

Medir precisamente o consumo e uso de energia por parte da mineração de criptomoedas é um processo complexo onde se é necessário analisar o consumo médio de cada máquina e avaliar pela quantidade de processos realizados por segundo. A exemplo, uma Antminer S9 com capacidade de gerar 14 terahashes por segundo consome um total de 1,372 Watts equivalente a meio milhão de vídeo games com potência de 40MW. Com isso, usando a eficiência dos equipamentos e o tamanho da rede de mineradores junto com a capacidade computacional se é possível estimar o consumo aproximado de energia dedicada unicamente para essa atividade. (DE VREIS, Alex, 2022)

Outro ponto em questão é, além do consumo com a própria mineração, o resfriamento dos aparelhos e instalações onde estão alocados os mineradores também é um ponto em questão, se tratando de equipamentos computacionais funcionando com processos complexos em escala 24/7 demandam uma potência de refrigeração elevada e conseqüentemente aumenta o consumo de energia das instalações.

Gráfico 3 - Consumo de energia pela mineração de Bitcoin, por fonte geradora (2021)



1. From September 1st 2019.

2. Based on latest Mining Map update.

Fonte: Cambridge Bitcoin Electricity Consumption Index, 2021.

Atualmente, o consumo de energia das transações do Bitcoin já ultrapassam o de muitos países desenvolvidos batendo a marca de mais de 146,53 terawatt-hora (TWh) em média o que é maior que o consumo anual de países como Argentina 121,6 TWh ou Suíça 56,41 TWh, ou seja uma única atividade relacionada a um único ativo criptográfico consome mais energia que países inteiros. Ademais, sabendo do alto consumo de energia atrelado a expectativas de retorno marginais dos mineradores, os mesmos procuram se instalar em países os quais possuem uma elevada produção de energia atrelado ao seu baixo custo, menores diretrizes em questões de aplicação ou evasão de moeda e baixa fiscalização ambiental ou financeira. Assim, os 3 principais países onde os mineradores estão instalados são: Estados Unidos da América (37,84%), China (21,11%) e Cazaquistão (13,22%). (Cambridge Bitcoin Electricity Consumption Index, 2021).

Tabela 1 - Relação de consumo de energia e eficiência das principais máquinas de mineração

Machine	Hashrate (TH/s)	Power Use (W)	Power Efficiency (J/GH)
Antminer S9	14	1,372	0.098
Antminer T9	12.5	1,576	0.126
Antminer T9+	10.5	1,332	0.127
Antminer V9	4	1,027	0.257
Antminer S7	4.73	1,293	0.273
AvalonMiner 821	11	1,200	0.109
AvalonMiner 761	8.8	1,320	0.150
AvalonMiner 741	7.3	1,150	0.160
Bitfury B8 Black	55	5,600	0.11
Bitfury B8	47	6,400	0.13

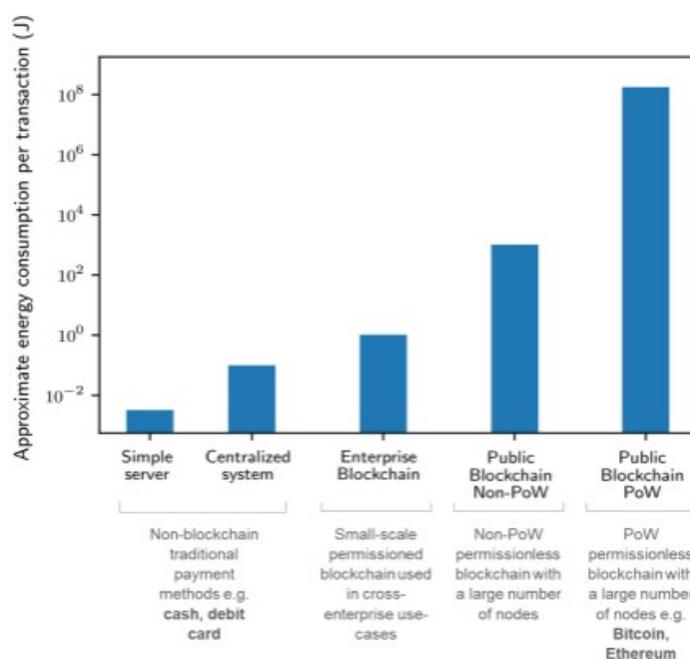
Fonte: Bitmain, Bitfury, and Canaan 2018.

E a partir desse consumo elevado de energia que se chega ao ponto: Qual o impacto das criptomoedas na emissão de carbono e efeito estufa? Esse ponto se responde com o fato de que menos da metade das fontes de energia atuais advirem de fontes renováveis e o uso do carvão, gás e petróleo na geração de energia ainda é abundante.

Dado a possibilidade de que realmente as criptomoedas façam parte da sociedade e estejam ganhando força e impacto econômico, a geração de energia atual ainda não está preparada para lidar com tecnologias de alta demanda energética tendo em vista que, energia renovável ainda é algo distante da realidade de muitos países, principalmente os em desenvolvimento, que para baratear os custos de seu processo de produção econômica, permanecem utilizando combustíveis fósseis, e mesmo países desenvolvidos como os Estados Unidos, ainda detêm uma grande dependência sobre energias não renováveis.

A questão a se fazer é se será que o problema está na tecnologia da mineração das criptomoedas como apontado por Alex de Vries ou é um problema estrutural de geração global de energia no qual se mantém majoritariamente em uma matriz há mais de um século.

Gráfico 4 - Comparação entre o consumo de energia por mineração de criptomoedas usando blockchain e sistema financeiro tradicional



Fonte: The Energy Consumption of Blockchain Technology: Beyond Myth, 2020.

Entender o processo de consumo de energia pela tecnologia blockchain e o funcionamento do “proof of work” juntamente em como esse atividade que se mostra crucial para a manutenção de ativos como o Bitcoin válidos e atrativos, escancara a deficiência tecnológica atual juntamente com a desigualdade em acesso a tecnologias de geração de energia limpa por países em desenvolvimento ou até mesmo a falta de interesse em alguns países desenvolvidos em efetivamente alterar a sua base energética e assim permitir que tecnologias como a blockchain e as criptomoedas consigam expandir sem gerar uma pegada de carbono gigantesca como é atualmente.

Pensar em como transformar a mineração de criptomoedas em uma atividade mais sustentável e de menor impacto ambiental pode partir de 2 frentes: medidas paliativas de curto prazo alterando apenas o sistema de mineração como por exemplo o “*Proof-of-Stake (PoS)*” que apresenta um menor consumo de energia por transação, uma vez que a validação e a criação de blocos são determinadas pela quantidade de moeda detida e “apostada” pelos participantes (*stackers*) o que por sua vez, não envolve o mesmo tipo de competição computacional intensiva, o que

resulta em um consumo de energia significativamente menor. (Muhammad Mahbubur Rashid e Mohammed Aatur Rahman).

Ou pode-se reduzir o impacto ambiental a partir de mudanças estruturais e permanentes na geração total de energia para o processo, optando por instalações de geração verde como solar ou eólica junto aos parques de mineração ou até mesmo a mudança eficiente de geração de energia da sociedade em destaque para países em desenvolvimento, o que não apenas reduziria o impacto ambiental da mineração como também propicia um desenvolvimento mais sustentável da sociedade como um todo.

Com isso, a partir da literatura atual onde já se demonstra os impactos da atividade no meio ambiente, objetiva-se ampliar o espaço de discussão sobre como atividades de alta demanda energética devem se ter uma análise dos seus reais impactos indiretos dado que essas tecnologias de moedas digitais se estabeleceram fortemente na sociedade e já não devem ser tratadas como algo de um futuro distante.

3 ANÁLISE ENERGÉTICA E DE MINERAÇÃO DE CRIPTOMOEDAS

A pesquisa se sustenta a partir de uma análise de trabalhos já publicados sobre o tema, além de uma análise demonstrativa sobre as transações do Bitcoin, geração de hashes, taxa de consumo de energia da mineração para cada transação e emissão de Co2, os principais países onde estão alocados os mineradores, mudanças de legislação dos principais países em relação à mineração e a matriz energética de cada um deles.

Assim, na análise serão selecionados os 3 principais países em proporção de hashes produzidos (EUA, China, Cazaquistão), e na análise da emissão de carbono por transação será utilizado os dados de 90 dias de transações mundiais a partir do banco de dados da Blockchain.

Para se entender o tamanho do mercado de mineração e se poder analisar o seu impacto real e até onde ele se estende, um documento publicado pela AMD (Advanced Micro Devices, Inc; 2023) descrevendo o processo de mineração, aponta que os aplicativos blockchain demonstram um potencial enorme para muitos setores chave. A analista do setor Gartner prevê que o valor agregado do negócio da blockchain aumentará para US\$176 bilhões até 2025.

Assim, sendo um mercado com grande expectativas de crescimento se entender e comparar o processo de mineração com o processo de cunhagem e impressão de papel moeda tradicional em quesito do seu impacto se mostra relevante onde segundo o trabalho de Taylor (2018), a cunhagem de moeda física indica que o Bitcoin já requer mais energia do que os processos globais de cunhagem de papel e moedas combinados, reforçando em como a mineração de criptomoeda gera tanto impacto ambiental quanto moeda tradicional. E de acordo com o artigo dos autores Samuel Asumadu Sarkodie, Maruf Yakubu Ahmed e Thomas Leirvik (2022) um aumento no volume de negociação de bitcoin impulsiona tanto a pegada de carbono quanto o consumo de energia em 24% a longo prazo, enquanto um choque dinâmico no volume de negociação amplia o consumo de energia e a pegada de carbono do bitcoin em 46,54%.

Da mesma forma, o artigo do Jiang (2021) apresenta que caso a China não aplicasse medidas severas em relação ao funcionamento da mineração no país, a pegada de carbono especificamente para a China bateria a marca de consumo de 296.59 TWh anuais em 2024, sendo um consumo superior ao de países como México e Itália.

Adicionalmente, no artigo do Stoll (2019) a dificuldade de se mapear e identificar com precisão onde, quantos mineradores existem, a foto primária de energia entre outros fatores justamente pelo fato de que, o processo de mineração pode partir de *gamers* que aproveitam do seu alto desempenho de GPU para minerar, o que pode ter causado uma volatilidade dos preço do *hardware*, como também a mineração pode ocorrer por empresas dedicadas possuindo instalações gigantescas para a atividade.

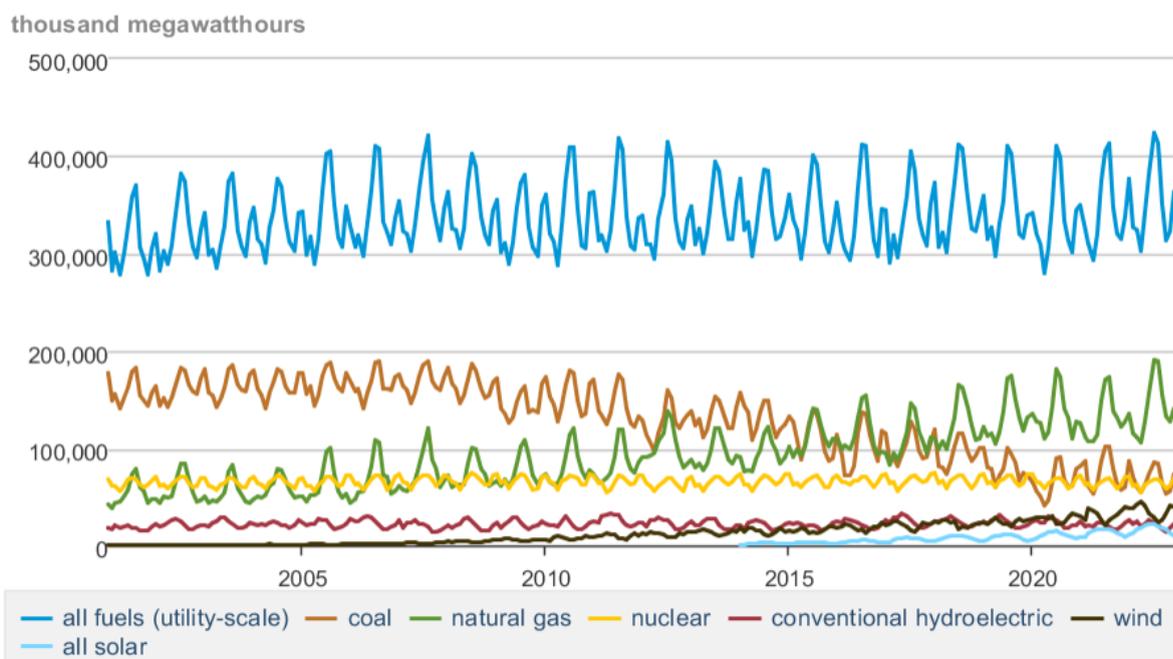
Conforme o autor De Vries (2022) alguns grupos de mineradores apresentam uma tendência de transição energia onde a presença de energia renovável no processo de mineração varia de 39% a 58%, contudo como as informações são divergentes dado que dependem da notificação por parte dos mineradores, o viés sobre a real participação de energia renovável acaba se tornando muito elevado. Ademais, segundo dados da School of Business and Economics, Vrije Universiteit Amsterdam (2021) a taxa de participação de energias convencionais a base de combustíveis fósseis variou de 55% para 61% de 2019 a 2021 demonstrando que ao contrário que se esperava a participação da energia fóssil aumentou no processo.

Mais ainda, o Relatório do Mercado de Energia de 2022 publicado pela IEA, aponta que a geração de energia a partir de fontes como o carvão apresentaram um aumento de 9% influenciado pelo expansão do consumo além da elevação do preço do gás natural que levou a uma substituição Gás-Carvão o que causou um aumento nas emissões de Co2 de 7% em 2021 a partir da geração mundial de energia contrastando com 2 anos passados de reduções. Conseqüentemente, a Finansinspektionen (2021), no artigo complementa da necessidade de regular as criptomoedas e impor restrições em como o processo de mineração opera dada ao destacado problema ambiental e em como a exemplo do valor de mercado do Bitcoin, criar um efeito cíclico onde a demanda por energia a partir desta atividade cresce comparativamente ao aumento do valor de mercado do ativo.

Os Estados Unidos em 2021 apresentava uma proporção de 37,84% da produção mundial de hashes por mineradores onde assumiu a liderança após a China banir no mesmo ano as instalações de mineração do país, com isso muitos migraram suas fazendas para os Estados Unidos onde a liberdade de empreendimento e baixa regulação em relação ao consumo de energia e uma rede ampla o suficiente para atender as mineradoras, além de que em alguns estados ocorrerem subsídio por parte de governadores, oferecendo benefícios fiscais, como

desconto na compra de máquinas e custeio de energia para atrair os mineradores. (Cambridge Bitcoin Electricity Consumption Index, 2021)

Gráfico 5 - Geração de energia por fonte nos Estados Unidos da América (2000-2023)

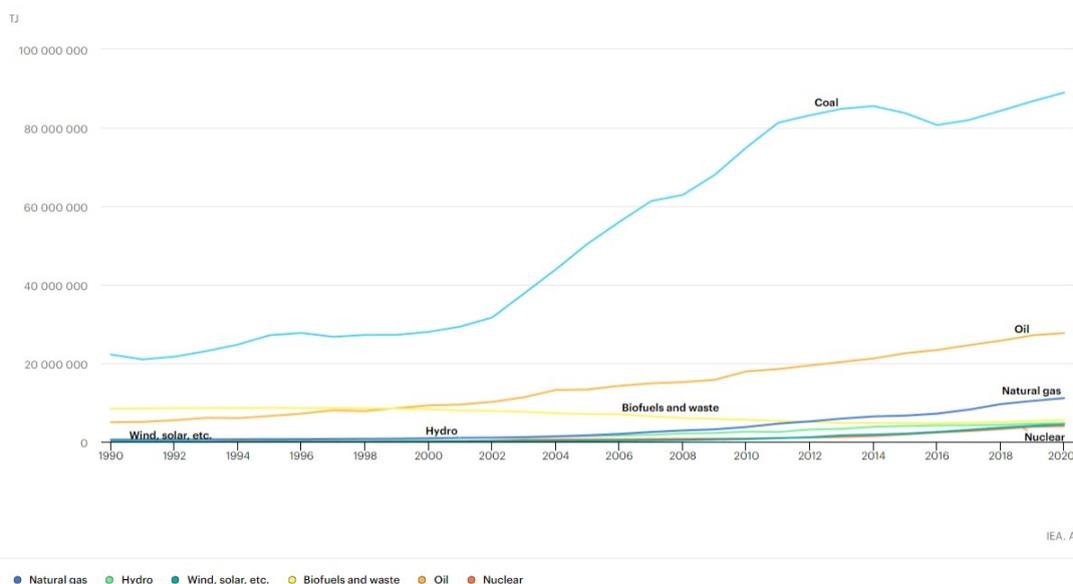


Fonte: U.S. Energy Information Administration (2020)

Como demonstrado no gráfico 4, a principal fonte de energia em 2023 foi o gás natural, porém a utilização de carvão que é ainda mais poluente se mantém em destaque, e o uso de energia renovável ainda se mostra de baixo impacto na produção total. Dado que mais de 30% das hashes geradas para o blockchain advém do mercado americano e o país mantém uma estrutura energética dependente de combustíveis fósseis e é pioneiro em uma atividade de intenso consumo de energia como é a mineração de criptomoeda, explicita que sim é uma atividade poluente. (U.S. Energy Information Administration, 2020)

A China em 2021 aplicou diversas proibições para a mineração no país, o que fez com que perdesse o posto de maior concentração de mineradores de 53% em 2020 para 0% em julho de 2021 e em dezembro chegar a 21%. O país aplicou diversas proibições para a atividade no país além de banir transações envolvendo criptomoedas, dado o caráter especulativo das moedas e seu impacto ambiental através da mineração, o que impacta as metas do país de reduzir a emissão de carbono. (Cambridge Bitcoin Electricity Consumption Index, 2021)

Gráfico 6 - Total de energia gerada por fonte China (1990-2020)



Fonte: IEA (2020).

Mesmo com o avanço dos investimentos na tentativa de mudar o papel do carvão na geração de energia na China, ainda sim grande parte da sua geração advém desse combustível e mesmo adotando proibições rígidas para a mineração, o país ainda se encontra em segundo lugar na geração de hashes.

Grandes fontes de petróleo e gás natural, energia barata e abundante além da proximidade com a China fizeram do Cazaquistão o segundo país com maior geração de hashes no mundo, ultrapassado pela China ainda no mesmo ano de 2021, permanecendo em terceiro lugar. O avanço acelerado da atividade no país levou a ações do governo na tentativa de regulamentar a atividade e consequentemente aplicar alguma tributação, chegando a um total de 7 milhões de dólares em 2022 e pretendendo elevar a tributação além de exigir que os mineradores tenham autorização do governo para atuarem no país. Tais regulações vieram a partir de protestos da população local contra o uso de energia não tributada pelos mineradores. (DW, 2022)

O país tenta transitar para uma fonte de energia mais renovável, porém ainda sim a queima de carvão duro, que tem o maior teor de carbono entre todos os tipos de carvão, e atividade de numerosas usinas termelétricas a carvão subcríticas - a forma menos eficiente de geração a carvão são de grande relevância na geração total de energia do país.

Assim, as principais fontes de energia do país advém de:

- Petróleo: O Cazaquistão é um dos principais produtores de petróleo da região da Ásia Central. O país possui reservas significativas de petróleo e é um importante produtor e exportador desse recurso.
- Gás natural: O Cazaquistão possui reservas consideráveis de gás natural. O país tem investido no desenvolvimento de campos de gás natural e na expansão da infraestrutura de transporte de gás.
- Carvão: Embora o Cazaquistão possua reservas de carvão, a participação dessa fonte na matriz energética tem diminuído nas últimas décadas. No entanto, o carvão ainda é utilizado para geração de eletricidade em algumas regiões do país.
- Energia nuclear: O Cazaquistão possui uma usina nuclear em funcionamento, a Usina Nuclear de Aktau, localizada no oeste do país. A energia nuclear desempenha um papel limitado na matriz energética, mas o governo tem planos de expandir a capacidade nuclear no futuro.
- Energias renováveis: O Cazaquistão tem um grande potencial para o desenvolvimento de energias renováveis, como a energia eólica, solar e hídrica. O país tem implementado projetos de energia renovável e estabelecido metas para aumentar a participação dessas fontes na matriz energética.

Juntamente com a China o Cazaquistão vem tomando medidas para regulamentar e conduzir a atividade de mineração para tentar regular e mitigar os possíveis riscos ambientais advindos do alto consumo. (IEA, 2020)

A partir da análise dos dados de mineração a partir do fluxo de informações disponibilizados pelo próprio sistema Blockchain e pelo Cambridge Bitcoin Electricity Consumption Index onde se disponibiliza as informações acerca da quantidade de hashes gerados pela mineração e em cada transação, sua demanda de energia e conseqüentemente do seu impacto ambiental. Com isto, é possível chegar em uma relação que se apresenta em um número de 39.682.972 de transações do período

de 28 de agosto a 22 de Novembro de 2023, o que para tal necessitou de 450 milhões de hash/dia para o total de transações o que ao todo durante o período analisado chega a 38,7 bilhões de hashes em 3 meses, gerando um retorno médio a todo o sistema de mineração de 32 milhões de dólares/dia.

Cada transação de bitcoin sobre o modelo de POW no sistema blockchain consome um total de 138 TW/h de energia/ano e cada transação consome um total de 648 kW/h de energia, e emitindo por transação 360kg de Co2, representando isso em uma tabela:

Total de Transações em 90 dias	Total de Hashs necessários	Energia necessária em TW/h	Total de carbono emitido em 90 dias de transações
39.682.972	38,7 bilhões	25,7 TW/h	15 Mt de Co2

Assim se comparar com consumos básicos da sociedade as transações de cada bitcoin, correspondem ao consumo total de aproximadamente a mais de 800 mil transações em moedas tradicionais, explicitando que o modelo de mineração por "Proof of Work" juntamente com a dependência de combustíveis fósseis dos países analisados se mostra totalmente ineficiente no ponto de vista ambiental.

3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A mineração de criptomoedas tem sido um tópico de discussão em relação ao seu impacto no consumo de energia e nas emissões de gases. Ao longo dos últimos anos, ocorreu um aumento significativo na popularidade das criptomoedas, o que resultou em uma expansão massiva da mineração desses ativos digitais. No entanto, essa atividade está associada a um consumo de energia considerável, principalmente devido ao uso intensivo de computadores de alta potência. Neste contexto, a relação entre mineração de criptomoedas, consumo de energia e emissões de gases é de importância para se determinar e entender os impactos ambientais e buscar soluções sustentáveis.

Em primeiro lugar, é importante reconhecer que a mineração de criptomoedas é um processo altamente intensivo em termos de energia. Os mineradores utilizam computadores potentes e algoritmos complexos para resolver problemas matemáticos e validar transações na rede blockchain. Esse processo requer uma quantidade considerável de eletricidade para alimentar os computadores e manter a operação contínua. Como resultado, a mineração de criptomoedas consome uma quantidade significativa de energia, muitas vezes comparável ao consumo de países inteiros.

Além disso, a mineração de criptomoedas está frequentemente associada ao uso de energia proveniente de fontes não renováveis, como o carvão e o gás natural. Essas fontes de energia fóssil têm um alto impacto ambiental e contribuem para as emissões de gases de efeito estufa. Dessa forma, a mineração de criptomoedas pode intensificar ainda mais as emissões de carbono, exacerbando os desafios das mudanças climáticas globais.

No entanto, vale ressaltar que nem toda mineração de criptomoedas é realizada com fontes de energia não renováveis. Alguns mineradores estão buscando soluções mais sustentáveis, como o uso de energia solar, eólica e hidrelétrica. Essas fontes de energia renovável podem ajudar a reduzir o impacto ambiental da mineração de criptomoedas, diminuindo as emissões de gases de efeito estufa e a dependência de combustíveis fósseis.

A conscientização sobre os impactos ambientais da mineração de criptomoedas tem levado a debates e esforços para encontrar soluções sustentáveis. Por exemplo, algumas iniciativas propõem a utilização de algoritmos

mais eficientes energeticamente ou a implementação de mecanismos de consenso alternativos, que requerem menos poder computacional. Além disso, estão sendo exploradas opções para promover a mineração descentralizada, utilizando dispositivos de baixa potência, como smartphones, para realizar a mineração de criptomoedas de forma mais eficiente e com menor consumo de energia.

Outro aspecto importante a ser considerado é o papel das empresas e governos na regulamentação da mineração de criptomoedas. A implementação de políticas e padrões ambientais mais rigorosos pode incentivar práticas mais sustentáveis na indústria da mineração. Além disso, a conscientização dos consumidores sobre o impacto ambiental da mineração de criptomoedas pode levar a uma demanda mais consciente e sustentável por moedas digitais.

5 REFERÊNCIAS

BALA, Analisa R. Bitcoin's carbon footprint is again making headlines, but there's a way to make cryptocurrencies cleaner. **FMI**, set. de 2021. Disponível em: <https://www.imf.org/external/pubs/ft/fandd/2021/09/how-to-make-cryptocurrencies-cleaner-and-greener.htm> Acesso em 20 de jun. 2023.

CAMBRIDGE, University. Center of Alternative Finance. **Cambridge Bitcoin Electricity Consumption Index**. Disponível em: <https://ccaf.io/cbeci/index> Acesso em 20 de jun. 2023.

DE VRIES, Alex. Bitcoin's Growing Energy Problem. **Joule**. Cambridge v. 2, n. 5, p. 801-805, 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2542435118301776> Acesso em 21 de jun. 2023

DE VRIES, Alex. The true costs of digital currencies: Exploring impact beyond energy use. **Joule**. Cambridge v. 4, n. 6, p. 786-789, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590332221002906> Acesso em 21 de jun. 2023.

DW. O que está por trás da crise no Cazaquistão. Roman Goncharenko. 2022 Disponível em: <https://www.dw.com/pt-br/o-que-está-por-trás-da-crise-no-cazaquistão/a-60349114> Acesso 21 Jun. 2023.

U.S. Energy Information Administration, 2023 Disponível em: <https://www.eia.gov> Acesso 21 Jun. 2023.

DE VRIES, Alex; GALLERSDÖRFER, Ulrich; STOLL, Christian; KLAABEN, Lena. Revisiting Bitcoin's carbon footprint. **Joule**. Cambridge v. 6, n. 3, p. 498-502, 2022. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2542435122000861?ref=pdf_download&fr=RR-2&rr=7de3d373bbd22776 Acesso em 27 de jun. 2023.

.COM, Blockchain 2023, Disponível em: <https://www.blockchain.com/explorer/charts/transaction-fees-usd> Acesso em 20 de jun. 2023.

DIGICONOMIST. Bitcoin Energy Consumption Index. 2018. Disponível em: <http://bitcoinenergyconsumption.com/> Acesso em 29 de jun. 2023

DE VRIES, Alex; GALLERSDÖRFER, Ulrich; STOLL, Christian; KLAASSEN, Lena. The true costs of digital currencies: Exploring impact beyond energy use. **One Earth**. v. 4, n. 6, p. 786-789. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2021.05.009> Acesso em 29 de Jun. 2023.

LE, K. China's crypto miners make hard choices to meet climate goals. (2021). Disponível em: <https://forkast.news/chinas-crypto-miners-climate/> Acesso em 29 de jun. 2023.

GALLERSDÖRFER, Ulrich; KLAASSEN, Lena; STOLL, C. (2020). Energy Consumption of Cryptocurrencies Beyond Bitcoin. **Joule**. v. 4, p. 1843–1846. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2542435120303317> Acesso em 29 de jun. 2023.

M. Sigalos. Kazakhstan's deadly protests hit bitcoin, as the world's second-biggest mining hub shuts down. 2022. Disponível em: <https://www.cnn.com/2022/01/06/kazakhstan-bitcoin-mining-shuts-down-amid-fatal-protests.html> Acesso em 29 de jun. 2023.

MALAR, João Pedro. O Bitcoin pode acabar? Entenda como funciona a escassez da criptomoeda. CNN. Disponível em: <https://www.cnnbrasil.com.br/business/o-bitcoin-pode-acabar-entenda-como-funciona-a-escassez-da-criptomoeda>. Acesso 19 Nov. 2023.

INFOMONEY. O que é o halving do Bitcoin? Disponível em: <https://www.infomoney.com.br/guias/halving-do-bitcoin/>. Acesso 19 Nov. 2023.

AMD. Blockchain Explained. Disponível em: <https://www.amd.com/pt/technologies/blockchain-explained>. Acesso 22 Nov. 2023.

TAYLOR,David. An Analysis of Bitcoin and the Proof of Work Protocols Energy Consumption, Growth, Impact and Sustainability. Disponível em: https://www.esru.strath.ac.uk/Documents/MSc_2018/Taylor.pdf Acesso 27 Nov. 2023.

SARKODIE,Samuel Asumadu; AHMED, Maruf Yakubu; LEIRVIK,Thomas. Trade volume affects bitcoin energy consumption and carbon footprint. **Finance Research Letters**. Volume 48. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1544612322002264#bib0014> Acesso 28 Nov. 2023.

JIANG, Shangrong; LI, Yuze; LU, Quanying; HONG, Yongmiao; GUAN, Dabo; XIONG, Yu; WANG, Shouyang. Policy assessments for the carbon emission flows and sustainability of Bitcoin blockchain operation in China. **Nature Communications**. Artigo nº 1938 Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41467-021-22256-3%20#Sec1>. Acesso em 28 Nov. 2023.

SSRN Papers. Disponível em: <https://deliverypdf.ssrn.com/delivery.php> Acesso em 28 Nov. 2023.

STOLL, Christian; KLAABEN, Lena; GALLERSDÖRFER, Ulrich. The Carbon Footprint of Bitcoin. **Joule**. Disponível em: [https://www.cell.com/fulltext/S2542-4351\(19\)30255-7](https://www.cell.com/fulltext/S2542-4351(19)30255-7) Acesso 28 Nov. 2023.

IEA. Surging electricity demand is putting power systems under strain around the world. Disponível em: <https://www.iea.org/news/surging-electricity-demand-is-putting-power-systems-under-strain-around-the-world>. Acesso em 28 Nov. 2023

FINANSINSPEKTIONEN. Crypto-assets are a threat to the climate transition – energy-intensive mining should be banned. 2021. Disponível em: <https://www.fi.se/en/published/presentations/2021/crypto-assets-are-a-threat-to-the-climate-transition--energy-intensive-mining-should-be-banned/>. Acesso em 28 Nov. 2023