

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

ERIK HENRIQUE PUNSKY OPATA

**ANÁLISE DE REDES BLOCKCHAIN PÚBLICAS PARA *TOKENIZAÇÃO* DE
EXCEDENTES DE ENERGIA ELÉTRICA**

MEDIANEIRA

2022

ERIK HENRIQUE PUNSKY OPATA

**ANÁLISE DE REDES BLOCKCHAIN PÚBLICAS PARA *TOKENIZAÇÃO* DE
EXCEDENTES DE ENERGIA ELÉTRICA**

**Analysis of public blockchain networks for tokenization of electric energy
surplus**

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentada como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Ciência da Computação da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador(a): Prof. Dr. Everton Coimbra de Araújo

Coorientador(a): Prof. Dr. Jorge Aikes Junior

**MEDIANEIRA
2022**



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

Esta licença permite download e compartilhamento do trabalho desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es), sem a possibilidade de alterá-lo ou utilizá-lo para fins comerciais. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

ERIK HENRIQUE PUNSKY OPATA

**ANÁLISE DE REDES BLOCKCHAIN PÚBLICAS PARA *TOKENIZAÇÃO* DE
EXCEDENTES DE ENERGIA ELÉTRICA**

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentada como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Ciência da Computação da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).
Orientador(a): Prof. Dr. Everton Coimbra de Araújo
Coorientador(a): Prof. Dr. Jorge Aikes Junior

Data de aprovação: 20/junho/2022

Prof. Dr. Everton Coimbra de Araujo
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof. Dr. Alessandra Bortoletto Garbelotti Hoffmann
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof. Dr. Ricardo Sobjak
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

MEDIANEIRA

2022

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que puderam contribuir para a realização deste trabalho, especialmente aos grandes incentivadores da minha formação, dona Walfrida pelo apoio financeiro e Marilia pelo suporte durante os períodos de dificuldade.

RESUMO

As unidades de mini e micro geração distribuída no Brasil vêm crescendo devido à uma série de incentivos governamentais, ampliando a participação do consumidor na geração de energia renovável e no sistema de compensação de energia elétrica. Na economia circular, é definido o conceito do uso circular, que implica no compartilhamento e reuso de recursos, como em um modelo *peer-to-peer* que promova a auto sustentabilidade no mercado de energia elétrica, permitindo que geradores e consumidores troquem *tokens* de energia elétrica entre si. Isto é possível com o uso de tecnologias como a Blockchain, difundida por meio das criptomoedas, ganhou espaço em outros segmentos da indústria, oportunizando a descentralização, transparência e imutabilidade dos dados, permitindo validar transações por meio de criptografia, eliminando a necessidade de um agente confiável para garantir a integridade da transação. Além disso, o uso dos contratos inteligentes em redes Blockchain públicas permitiu que programadores pudessem desenvolver estruturas lógicas para atender diversos modelos de negócios pagando apenas pelo custo computacional da execução de código na rede. Assim, este trabalho teve como objetivo analisar os custos do uso de redes Blockchain públicas para a submissão de um contrato inteligente desenvolvido em parceria com uma instituição de ciência e tecnologia do mercado de energias renováveis, e para a transferência de *tokens* lastreados em energia elétrica nas redes, onde a rede Polygon obteve maior atratividade devido ao baixo custo para execução de código na rede.

Palavras-chave: Blockchains; Geração distribuída; Análise de valor.

ABSTRACT

Mini and micro distributed generation units in Brazil have been growing due to a series of government incentives, increasing consumer participation in renewable energy generation and in the electricity compensation system. In the circular economy, the concept of circular use is defined, which implies the sharing and reuse of resources, as in a peer-to-peer model that promotes self-sustainability in the electricity market, allowing generators and consumers to exchange energy tokens. electrical with each other. This is possible with the use of technologies such as Blockchain, disseminated through cryptocurrencies, has gained space in other segments of the industry, providing opportunities for decentralization, transparency and immutability of data, allowing to validate transactions through encryption, eliminating the need for an agent. trusted to ensure transaction integrity. In addition, the use of smart contracts in public Blockchain networks allowed programmers to develop logical frameworks to meet various business models, paying only for the computational cost of executing code on the network. Thus, this work aimed to analyze the costs of using public Blockchain networks for the submission of a smart contract developed in partnership with a science and technology institution in the renewable energy market, and for the transfer of tokens backed by electricity in the networks, where the Polygon network was more attractive due to the low cost of running code on the network.

Keywords: Blockchains; Distributed Generation; Value analysis

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – DLT: todos os participantes compartilham e validam a rede	25
Figura 2 - Assinatura digital em uma cadeia de transações na rede Blockchain	29
Figura 3 - Cadeia de Timestamp na rede Blockchain.....	30
Figura 4 - Encadeamento de Blocos.....	31
Figura 5 - Comparação da topologia de redes sobrepostas totalmente conectadas (a) e protocolo Gossip (b).	32
Figura 6 - Mudança de estado global na rede Ethereum	34
Figura 7 - Tipos de contas na rede Ethereum.....	35
Figura 8 - Area dos participantes da BMG nas três grids de distribuição: Borough Hall (vermelho), Park Slope (verde) e Bay Ridge (roxo).....	42
Figura 9 - Fluxograma de atividades	48
Figura 10 - Fluxo de transação de valor entre atores.....	50
Figura 11 - log de submissão do contrato inteligente no Remix IDE.....	52
Figura 12 - Resultado do Etherscan ao consultar o hash da transação executada.....	52

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Proporção da matriz elétrica brasileira no SIN	18
Gráfico 2 - Evolução da potência instalada de GD no Brasil (2017-2020)	20
Gráfico 3 - Participação por fonte na GD (em %) - Brasil (mar./2020).....	20
Gráfico 4 - Preço médio mensal em gwei por unidade de gás nas redes selecionadas.....	53
Gráfico 5 – Preço médio em USD de submissão do contrato inteligente nas redes selecionadas.....	54
Gráfico 6 – Preço médio em USD de transferência de <i>tokens</i> entre endereços	54
Gráfico 7 - Preço do ETH em dólar americano entre fevereiro e abril de 2022 ..	55
Gráfico 8 – Dispersão de preço médio diário de gas em <i>gwei</i> na rede ETH durante 90 dias	56
Gráfico 9 - Preço do ETC em dólar americano entre fevereiro e abril de 2022 ..	57
Gráfico 10 – Dispersão de preço médio diário de gas em <i>gwei</i> na rede ETC durante 90 dias	57
Gráfico 11 - Preço do BNB em dólar americano entre fevereiro e abril de 2022	58
Gráfico 12 - - Dispersão de preço médio diário de gas em <i>gwei</i> na BSC durante 90 dias	59
Gráfico 13 - Preço do MATIC em dólar americano entre fevereiro e abril de 2022	60
Gráfico 14 – Dispersão de preço médio diário de gas em <i>gwei</i> na rede Polygon durante 90 dias	60
Gráfico 15 - Preço do AVAX em dólar americano entre fev e abr de 2022	61
Gráfico 16 - Dispersão de preço médio diário de gas em <i>gwei</i> na rede Avalanche durante 90 dias	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Capacidade instalada de geração de energia elétrica (por MW).....	17
Tabela 2 - Tupla de valores em gas e operações possíveis em uma EVM	36
Tabela 3 - Relação de unidades de wei na rede Ethereum	39

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACL	Ambiente de Contratação Livre
ACR	Ambiente de Contratação Regulada
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BTC	Bitcoin
CCEE	Câmara de Comercialização de Energia Elétrica
DAO	Organizações Autônomas Descentralizadas
DLT	<i>Distributed Ledger Technology</i>
EIP	<i>Ethereum Improvement Proposal</i>
EOA	External Owned Account
ERC	<i>Ethereum Request for Comments</i>
ETH	Ethereum
EVM	Ethereum <i>Virtual Machine</i>
GD	Geração Distribuída
GW	Gigawatt
ICT	Instituição de Ciência e Tecnologia
ITU	<i>Internation Telecommunication Union</i>
KWH	Quilowatt-hora
LTC	Litecoin
P2P	<i>Peer-to-peer</i>
PoW	<i>Proof of Work</i>
RED	Recursos Energéticos Distribuídos
SIN	Sistema Interligado Nacional
TUSD	Tarifa de Uso do Sistema de Distribuição
TUST	Tarifa de Uso do Sistema de Transmissão
USD	Dólar Americano

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	Objetivos geral e específicos	12
1.1.1	Objetivos específicos.....	12
1.2	Justificativa	12
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	14
2.1	Energia elétrica renovável	14
2.2	Setor elétrico brasileiro	16
2.2.1	Geração distribuída no Brasil	19
2.3	Economia circular	22
2.3.1	Economia circular por meio da geração de energia elétrica.....	23
2.4	Tecnologia Blockchain	24
2.4.1	Chaves, Endereços e Carteiras.....	28
2.4.2	Cadeia de Blocos	29
2.4.3	Prova de trabalho	30
2.4.4	Nós	31
2.5	Ethereum Blockchain	32
2.5.1	Contratos inteligentes.....	35
2.5.2	Taxas e gas na rede Ethereum	36
2.6	Blockchain na comercialização de eletricidade	41
2.6.1	Brooklyn Microgrid.....	41
2.6.2	Exergy LO3 Energy	42
2.6.3	Powerledger	44
3	MATERIAIS E MÉTODOS	45
3.1	Materiais	45
3.2	Métodos	48
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	52
4.1	Rede Ethereum	55
4.2	Rede Ethereum Classic	56
4.3	Rede Binance Smart Chain	58
4.4	Rede Polygon	59
4.5	Rede Avalanche	61
5	CONCLUSÃO	63
5.1	Trabalhos Futuros	63

REFERÊNCIAS.....	64
------------------	----

1 INTRODUÇÃO

A produção de energia elétrica a partir de fontes renováveis (eólica, solar, dentre outras) vem aumentando, pois, as Nações Unidas juntamente com o documento de Objetivos de Desenvolvimento Sustentável¹, têm por objetivo o aumento substancial de energia limpa e acessível até 2030, ganhando espaço em produções conhecidas como micro ou minigeração de energia elétrica (CCEE, 2020; ONU BRASIL, 2021).

A partir desse cenário, origina-se os recursos energéticos distribuídos (RED), que são estabelecidos como tecnologias que possam vir a gerar e/ou armazenar energia elétrica a qual é localizada dentro de limites determinados por meio de uma concessionária de distribuição de energia, ampliando a participação do consumidor na geração e gestão de energia (EPE, 2019).

Por meio da quarta revolução industrial iniciada em meados de 2010, a incorporação entre geração de energia e utilização de tecnologias advindas dela estão sendo fundidas, o que consiste na interação de infraestruturas inteligentes, como por exemplo, o Smart Home e a geração de energia por meio de placas solares (KAGERMANN *et al.*, 2013 apud SILVA *et al.*, 2017). A tecnologia Blockchain também é candidata a ser um dos conceitos mais importantes da quarta revolução industrial (BODKHE 2020), e de acordo com Allidina (2016) pode ser vista como uma tecnologia emergente, com aplicabilidade potencial para ativos tangíveis e intangíveis por oferecer um registro de dados de maneira distribuída, baseado em blocos por meio de um mecanismo de consenso compartilhado dentro da rede. A natureza distribuída da Blockchain garante a realização de transações *peer-to-peer* (P2P) entre os participantes da rede, que possibilita expressar valores por meio dessas transações como créditos de energia gerada ou a representação de uma *commodity* qualquer, sem a necessidade de um agente intermediário.

Aliadas à sua estrutura distribuída, a Blockchain age como mecanismo de controle, e torna-se forte candidato à ferramenta de digitalização no setor de energia pela popularidade de sistemas distribuídos de energia e a necessidade emergente de

¹ O objetivo número sete relaciona a necessidade de energia limpa e acessível e pode ser acessada no site oficial <https://odsbrasil.gov.br/objetivo/objetivo?n=7>

fontes de energias renováveis, atraindo a atenção de pesquisadores pelo tema (YILDZBASI, 2021).

Neste trabalho foi desenvolvido um contrato inteligente conjuntamente à uma Instituição de Ciência e Tecnologia (ICT) do ramo de biogás, que norteou as atribuições do *token* e as regras de negócio para a representação do excedente de energia elétrica oriunda da geração distribuída, para assim estimar seus custos para a posterior comparação entre redes Blockchain públicas do mesmo tipo.

Analisar os custos relacionados a execução de contratos inteligentes em redes públicas tem como objetivo permitir uma melhor assertividade na seleção de uma rede Blockchain com a possibilidade da criação de uma economia circular entre os consumidores cativos e os produtores de energia dentro do raio de atuação de uma distribuidora de energia.

1.1 Objetivos geral e específicos

O trabalho teve como objetivo geral realizar um comparativo de custos entre redes Blockchain públicas, compatíveis entre si, para a criação de *tokens* de créditos de energia que possibilite transações P2P entre os participantes.

1.1.1 Objetivos específicos

Para atingir o objetivo, definiu-se etapas que se dividem em:

- Desenvolver um contrato inteligente para gerir as transações de *tokens* na rede de estudo;
- Identificar redes Blockchain compatíveis com o contrato inteligente desenvolvido;
- Calcular os custos de submissão do contrato inteligente para cada rede Blockchain;
- Analisar os dados obtidos e comparar os custos entre as redes Blockchain.

1.2 Justificativa

Os avanços na área de sistemas de informação em conjunto com a redução dos custos de energia renovável, especialmente a energia solar fotovoltaica, que recebe subsídios em diversos países e adequações para receber o aumento de

energia renovável, possibilitou uma base para o remonte das origens dos sistemas de distribuição de energia, quando era preponderantemente centralizado (BAKKE, 2016). Nesta conjuntura, novas formas de comercialização de energia estão sendo discutidas pelo mercado e a academia, considerando os avanços tecnológicos e o cenário de crescimento dos Recursos Energéticos Distribuídos (RED).

De acordo com World Energy Council (2017, apud EPE,2019) os países irão transicionar para sistemas de geração de energia descentralizados, em que o fluxo de energia é direcionado aos consumidores para sistemas híbridos, o qual são compostos por sistemas elétricos de geração e consumo no próprio local, ou em conjunto com a rede das distribuidoras de energia, adicionando maior complexidade nas redes elétricas, uma vez que altera o fluxo de energia na rede.

A descentralização da geração de energia em uma economia conectada e moderna traz vantagem para além do campo da sustentabilidade e da ampliação da participação do consumidor, antes somente final, de energia elétrica ao permitir estruturas de comercialização como o P2P.

A complexidade de gerenciamento e aplicação podem ser minimizadas com uso de arquiteturas descentralizadas como a Blockchain, agindo não só como um livro razão para a contabilidade das transações que são efetuadas, mas também promovendo transparência, rastreabilidade, segurança, e controle que permitem a implementação de estruturas sustentáveis dentro de um modelo de economia circular possibilitando um novo paradigma sobre a comercialização de energia elétrica.

Na perspectiva da distribuidora de energia, entender os custos relacionados à implantação de *tokens* de energia elétrica a partir de Blockchains públicas aumenta a capacidade de tomadas de decisão quanto a viabilidade, manutenção e precificação de serviços dessa natureza, e proporciona uma capacidade de comparação de custos entre redes Blockchain públicas e permissionadas para o mesmo propósito.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Esta seção define os conceitos e tecnologias que fundamentaram o trabalho, iniciando pela abordagem conceitual da energia elétrica renovável e seu contexto no setor elétrico brasileiro, para assim relacioná-la à economia circular e as qualidades da Blockchain que garantam sua viabilidade bem como outros estudos correlatos envolvendo Blockchain na indústria de energia elétrica.

2.1 Energia elétrica renovável

Energia é uma grandeza física que vem por meio do inter-relacionamento de dois sistemas físicos, mas em suma significa a capacidade de realização de trabalho (MOREIRA, 2019).

Grande parte da energia elétrica produzida provém de fontes não renováveis, ou seja, por meio de combustíveis fósseis. Contudo, está ocorrendo uma tendência de diminuir a geração de energia a partir dessas matrizes elétricas e aumentando a geração a partir de fontes renováveis, como biomassa, eólica e solar (TIEPOLO *et al.*, 2018). Este fato se dá nas discussões do âmbito político, econômico e acadêmico que repensam o uso de produção de energias atuais para conscientizar as pessoas e empresas a aderirem um sistema de produção renovável (RODRIGUES *et al.*, 2018).

As energias são consideradas renováveis quando não emitem gases que ocasionam o efeito estufa, ou que utilizam de fenômenos da natureza como as marés ou os ventos, para transformação de energia elétrica. Atualmente, são consideradas energias renováveis: energia fotovoltaica, eólica, hídrica, biomassa, geotérmica, oceânica e hidrogênio (EPE, 2021).

A energia fotovoltaica é proveniente da captação da energia luminosa do sol e é transformada em energia elétrica. Isso se dá através de tecnologias de conversão fotovoltaica que aproveita a irradiação solar por meio de células e painéis fotovoltaicos e converte a luz em eletricidade, onde as partículas fótons colidem com os átomos de silício presentes nos painéis solares gerando um deslocamento de elétrons, este efeito é conhecido como efeito fotovoltaico (RODRIGUES *et al.*, 2018).

Cada célula proveniente do painel é composta por camadas de materiais semicondutores, que quando a radiação solar incide gera um potencial elétrico, conhecido como tensão (Volts). Esse potencial é responsável por facilitar a circulação

de corrente elétrica (ampere) quando o circuito externo é fechado (PHILIPPI; REIS, 2016). Estas correntes elétricas são do tipo contínua, e são convertidas para corrente alternada com o uso de um inversor solar, podendo ser consumidos pelos aparelhos elétricos nas residências.

Este tipo de tecnologia é o mais adotado para a geração entre os consumidores cativos, onde existem três tipos de funcionamento de sistemas fotovoltaicos, o *on-grid*, em que o sistema é conectado à rede e injeta diretamente a energia para a rede elétrica, o *off-grid* que funciona por meio de baterias que armazenam a eletricidade em sistemas isolados ou autônomos, e o sistema híbrido que opera de modo simultâneo entre *on-grid* e *off-grid*, conectando-se à rede quando não houver carga nas baterias (PORTAL SOLAR, 2022).

Segundo Fadigas (2011), a energia eólica vem por meio do proveito da energia que é gerada a partir dos ventos, e é uma forma de produção de eletricidade de maneira renovável com um grande potencial.

O primeiro modelo de gerador de energia elétrica por meio de ventos foi criado em 1887 por James Blyth, para iluminar sua residência e com o passar dos anos, a tecnologia foi se desenvolvendo e no ano de 2021 a ANEEL calcula que o Brasil produz 17.525 MW e possui 699 unidades geradoras (AID, 2021; PINTO, 2012).

De acordo com Pinto (2012), o vento consiste em ar em movimento, isso é ocasionado devido a circulação das camadas de ar provocada pelo aquecimento desigual do planeta. Para se produzir energia através do vento foram criadas as turbinas eólicas que são equipamentos que absorvem parte da energia cinética do vento, e convertem em energia mecânica que por fim é convertida em energia elétrica através do gerador que é acoplado nela.

De acordo com Bortoleto (2001), usinas hídricas transformam a energia cinética do movimento das águas em energia elétrica. A energia hidráulica é proveniente da irradiação solar e da energia gravitacional, que permitem a condensação, precipitação e evaporação das águas.

Para Vichi e Mansor (2009) a energia hidráulica é uma das maiores fontes renováveis de energia, correspondendo em 2006 a 17% de todas as fontes renováveis de energia no mundo e segundo a ANEEL (2018), no Brasil, a principal fonte de geração é hídrica, que corresponde a 66,6% da capacidade instalada em operação no país.

2.2 Setor elétrico brasileiro

No setor elétrico brasileiro existem quatro segmentos de atuação: a geração de energia, composta por geradores públicos e privados, autoprodutores e produtores independentes, a transmissão, responsável pelo transporte da energia do ponto da geração para o ponto de distribuição, composta por empresas que detenham lotes de transmissão, a distribuição, convertendo a energia para uma tensão menor e transportando-a para o consumidor final, e, por fim, a comercialização, onde é feita a compra e venda de energia elétrica no ambiente de contratação livre (ENERGISA, 2020). O Quadro 1 elenca os quatro segmentos do setor elétrico brasileiro relacionando-os com seus participantes e suas atribuições.

Quadro 1 - Segmentos do setor elétrico brasileiro e suas atribuições

	Geração	Transmissão	Distribuição	Comercialização
Função	Geração de energia	Transporte de energia da geração até a distribuição	Conversão da energia e transporte ao consumidor final	Compra e venda de energia no ambiente de contratação livre
Participantes	Geradores públicos/privados /autoprodutores	Empresas públicas/privadas	Concessionária de distribuição	Geradores, comercializadores e consumidores livres

Fonte: Adaptado de ENERGISA (2020)

A transmissão de energia, responsável pela ligação entre os centros de geração e as unidades consumidoras é possível graças ao Sistema Interligado Nacional (SIN), cuja extensão da rede básica de transmissão do Brasil é de 141.756 km de linhas de transmissão, percorrendo praticamente todo o território nacional, com exceção de Roraima, sendo um dos maiores sistemas de transmissão do mundo, abrangendo 98% da distribuição de energia no país (ANEEL).

Contextualizar a matriz elétrica brasileira contribui para o entendimento da situação dos recursos energéticos utilizados na geração de energia do país.

A Tabela 1 ilustra a capacidade de geração de energia elétrica instalada, segundo dados do Balanço Energético Nacional 2019: ano-base 2018, com destaque para a predominância da geração de energias renováveis, especialmente a hidrelétrica, com 104 gigawatt (GW) de capacidade instalada, correspondendo a 66,6% da matriz elétrica com possibilidade de 40% de expansão dessa fonte (BRASIL, 2019).

Tabela 1 - Capacidade instalada de geração de energia elétrica (por MW)

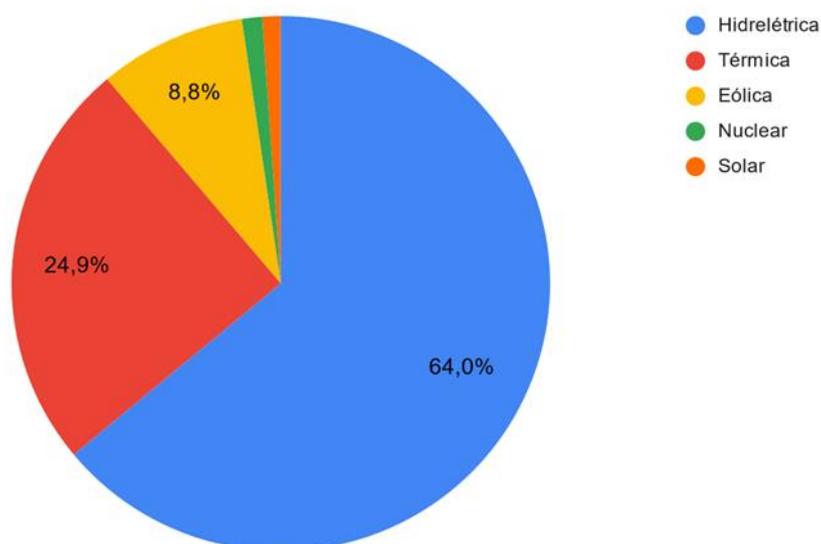
Matriz Energética	Megawatt Gerado (MW)
Hidrelétrica	104.139
Térmica	40.523
Eólica	14.390
Nuclear	1.990
Solar	1.798
Total	162.840

Fonte: Adaptado de BRASIL (2019)

Posteriormente, as termelétricas são de grande importância para o SIN, não só pela disponibilidade de fonte primária, mas pelo uso de máquinas rotativas em regime permanente para gerar energia elétrica, estratégia que auxilia no controle da tensão e da frequência gerada, promovendo estabilidade elétrica no SIN (SILVA, 2020). Dividem-se em fontes renováveis como a biomassa, e não renováveis, como gás e derivados de petróleo.

Outra fonte importante com 8,8% da matriz elétrica brasileira é a energia eólica, que vem se tornando cada vez mais significativa dado o potencial eólico no país, ainda que apresente despachabilidade reduzida, em comparação com as usinas termelétricas e hidrelétricas por ser uma fonte intermitente de energia, adicionando um maior esforço para o controle da estabilidade e na integração ao SIN (SILVA, 2020).

O Gráfico 1 demonstra a proporção da matriz elétrica no SIN.

Gráfico 1 - Proporção da matriz elétrica brasileira no SIN

Fonte: Adaptado de Brasil (2019)

O sistema de distribuição de energia elétrica corresponde a uma parte do setor elétrico que realiza a redução do nível de tensão proveniente do sistema de transmissão, oriunda das centrais geradoras da rede básica, para o atendimento do consumidor final. É um setor regulado pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e incorpora 109 empresas concessionárias, permissionárias e autorizadas, responsáveis por transportar a energia elétrica até as residências e pequenos comércios e indústrias.

Toda a energia gerada para o país se destina à sua comercialização, onde se estabelecem dois ambientes de contratação de energia: Ambiente de Contratação Regulada (ACR) e Ambiente de Contratação Livre (ACL). No ACR, as distribuidoras devem garantir a contratação de 100% de seu mercado por intermédio de contratos de leilões públicos regulados pela ANEEL e operacionalizados pela Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE) sendo o decreto 5.163/2004, para atender a demanda do consumidor cativo, ou seja, aquela unidade consumidora que compra energia compulsoriamente da empresa detentora da concessão onde está conectada, e que paga uma fatura mensal de consumo, incluindo as tarifas de imposto e serviços de distribuição. Já no ACL, o ambiente de contratação se dá mediante operações envolvendo os agentes vendedores (geradores e comercializadores) e o consumidor final, que neste caso pode optar pelo fornecedor de energia por meio de contratos bilaterais, nos quais ficam estabelecidos prazos, volumes, índices de

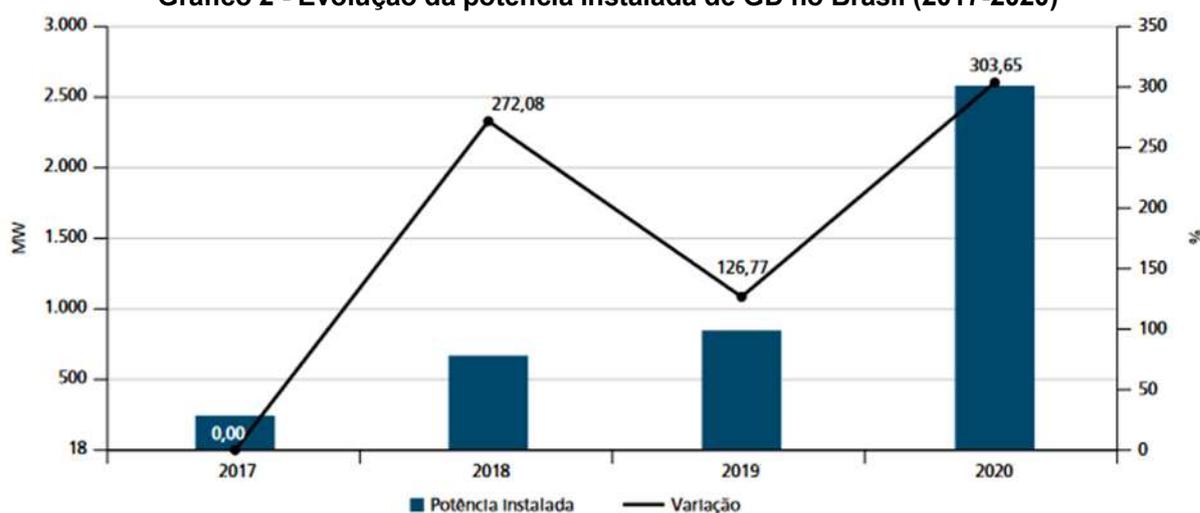
correção e flexibilidades. Nessa modalidade, o consumidor é chamado de consumidor livre, por se valer de condições livremente pactuadas entre as partes, onde a unidade consumidora paga para a distribuidora pela Tarifa de Uso do Sistema de Distribuição (TUSD) e outra fatura com o preço acordado em contrato para o fornecedor de energia (ENERGISA, 2020).

2.2.1 Geração distribuída no Brasil

Desde abril de 2012, o Brasil começou a utilizar o sistema de compensação *net-metering*, quando entrou em vigor a Resolução Normativa ANEEL nº 482/2012 como principal instrumento regulador posteriormente aprimorada pela Resolução nº 687/2015 (ANEEL, 2015), que permitiu o consumidor a agregar a função de fornecedor e consumidor, criando a figura do prosumidor, podendo se tornar um gerador de sua própria energia elétrica a partir de fontes renováveis e injetar o excedente no sistema de distribuição para uma compensação futura, denominando-se microgeração distribuída (até 75 quilowatts). Ou seja, quando a quantidade de energia gerada em determinado mês for superior à energia consumida naquele período, o consumidor adquire "créditos de energia" com validade de 60 meses, que podem ser utilizados para diminuir a fatura nos meses seguintes, trata-se da geração distribuída de energia elétrica (GD), modalidade que beneficia o sistema elétrico adiando investimentos em expansão do sistema de transmissão e distribuição, mas também na redução do carregamento da rede e diversificação da matriz energética, aliando economia financeira, consciência socioambiental e autossustentabilidade (ANEEL, 2018).

A modalidade de geração distribuída tem crescido no Brasil e um aumento de 303,65% entre 2019 e 2020 pode ser observado no Gráfico 2, devido a condições internas como os subsídios e a figura da "geração compartilhada", que possibilitou a abertura de um consórcio ou cooperativa na instalação de minigeração distribuída para redução das faturas dos envolvidos, mas também outras regulações favoráveis que contribuem para este aumento. Para Rolim e Toshioka (2021), o crescimento da GD é impulsionado tanto pela queda nos preços dos sistemas de geração fotovoltaicos e na facilidade de instalação, como por programas de incentivo e linhas especiais de financiamento.

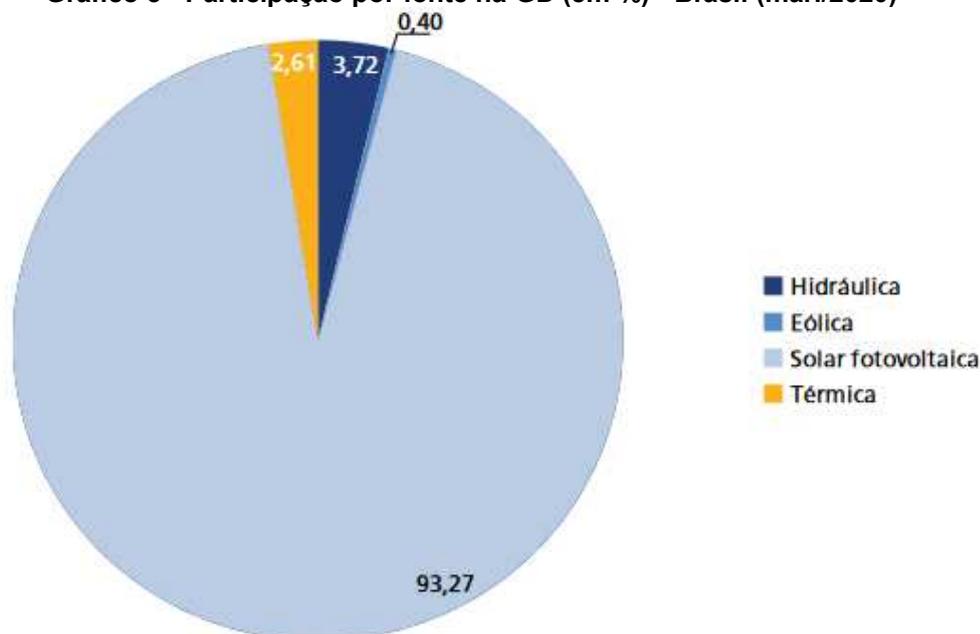
Gráfico 2 - Evolução da potência instalada de GD no Brasil (2017-2020)



Fonte: Adaptado de Brasil (2019)

A geração distribuída no Brasil tem predominância de instalações de usinas fotovoltaicas, como é observado no Gráfico 3. A capacidade acumulada de geração da energia solar entre 2012 e março de 2020 corresponde a 93,27% de toda a capacidade de geração distribuída instalada.

Gráfico 3 - Participação por fonte na GD (em %) - Brasil (mar./2020)



Fonte: Silva (2020, apud Aneel 2012)

Para além dos benefícios reconhecidos da GD para a redução das perdas técnicas e descarbonização da matriz elétrica, o crescimento expressivo dessa modalidade é acompanhado por efeitos de distorções inerentes ao sistema *net-metering*, manifestados como subsídio cruzado entre consumidores não-adoptantes e

aqueles que se tornaram prosumidores, pois de acordo com as regras estabelecidas, a compensação dos créditos de energia injetada ocorre na proporção 1:1, assim os créditos oriundos da GD passam a ter o mesmo valor dos serviços fornecidos pela distribuidora, englobando a parcela de energia, componentes tarifários ao uso do sistema de transmissão e distribuição e encargos regulatórios, gerando um desvirtuamento onde os custos da prestação de serviços de distribuição, que acabam sendo rateados entre todos os consumidores em detrimento de um montante menor de quilowatt-hora (KWh) fornecido (ROLIM; TOSHIOKA, 2021).

Para tratar essas distorções relacionadas as tarifas de energia, iniciou-se um processo de revisão das regras aplicáveis à micro e minigeração distribuída, discutindo a partir da Nota Técnica nº 0078/2019, que aborda propostas para alterações na base de compensação, incluindo os componentes da Tarifa de Uso do Sistema de Distribuição (TUSD) e Transmissão (TUST).

As análises enfocaram quais componentes da tarifa de distribuição deveriam ser atribuídos aos prosumidores, para equilibrar a remuneração pelo uso da infraestrutura da rede elétrica, resultando na criação do Projeto de Lei 5829/2019² e posteriormente, após revisões passou a vigorar a partir de 6 de janeiro de 2022 a Lei nº 14.300/2022³, também conhecida como Marco Legal da Geração Distribuída.

Segundo Mayer Brown (2022), as principais disposições da Lei nº 14.300/2022 são:

- Limites da potência instalada da minigeração distribuída passam a ser distintos para fontes despacháveis (que podem ser acionadas a qualquer momento), com potência máxima instalada de até 5MW, e para fontes não despacháveis com potência máxima instalada de até 3MW;
- Adição da possibilidade de qualquer espécie de associação civil, composta por pessoas físicas ou jurídicas desde que sejam instituídas especificamente para geração compartilhada e que todas as unidades consumidoras sejam atendidas pela mesma distribuidora;
- Direito adquirido aplicáveis até 2045 para unidades consumidoras já participantes da GD ou que protocolarem a solicitação de acesso na

² A PL 5829/2019 pode ser acessada na íntegra em <https://legis.senado.leg.br/sdleg-getter/documento?dm=9017948&ts=1648564328663&disposition=inline>

³ A Lei 14.300/2022 pode ser acessada na íntegra em http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2022/lei/L14300.htm

distribuidora em até 12 meses contados após a vigência da lei, continuando a incidência das componentes tarifárias sobre a diferença positiva entre a energia consumida e a energia injetada no mês;

- Período de transição de 6 anos para consumidores que protocolarem solicitação de acesso após os 12 meses de vigência da lei, com incidência gradual das componentes tarifárias relativas à remuneração dos ativos do serviço de distribuição, quota de reintegração regulatória e custo do uso do serviço de distribuição (TUSD), sendo 15% em 2023, 30% em 2024, 45% em 2025, 60% em 2026, 75% em 2027, 90% em 2028 e 100% em 2029.
- Não incidência das bandeiras tarifárias sobre os excedentes, que incidirão apenas sobre o consumo de energia elétrica ativa a ser faturada;
- As distribuidoras poderão contratar a prestação de serviços ancilares por parte dos micros e minigeradores distribuídos, os quais serão remunerados de acordo com a regulamentação da ANEEL;
- Instalações de iluminação pública municipal poderão participar do sistema de compensação, sendo considerada uma unidade consumidora com micro ou minigeração distribuída;
- Impossibilidade de comercialização do parecer de acesso ou transferência de titularidade da unidade consumidora ou do controle societário de unidade consumidora antes da construção e instalação da GD e solicitação de vistoria do ponto de conexão para a distribuidora;
- Criação do Programa de Energia Renovável Social (PERS), o qual promoverá investimentos na instalação de sistemas de fontes renováveis em benefício dos consumidores da subclasse residencial de baixa renda.

De maneira geral, a nova lei proporciona uma maior estabilidade e equilíbrio para uso de fontes limpas e sustentáveis.

2.3 Economia circular

Para contextualizar a economia circular, primeiramente é necessário explanar sobre os tipos de economias que existem, sendo elas: linear, performance e circular.

A economia linear pode ser comparada com o fluxo de um rio, em que o mesmo leva recursos naturais e vai transformando-os em produtos e agregando valor até chegar ao ponto da venda. Quem compra o produto carrega consigo os riscos e

desperdícios, e ele decide se irá reciclar/reutilizar ou não. As companhias só se preocupam em lucrar com a venda de grandes volumes de produtos (STAHEL *et al.*, 2016).

A economia por performance tem conceitos além da economia linear, pois ela tem como premissa a venda de bens como serviços por meio de aluguéis ou negócios compartilhados. A empresa carrega consigo as responsabilidades de riscos e desperdícios no decorrer do ciclo do produto, além do mais ela foca em soluções para prevenir os desperdícios, por exemplo. Em suma, os ganhos não são o seu foco (STAHEL *et al.*, 2016).

Por fim, a economia circular pode ser comparada como um lago, pois o processamento de bens materiais gera empregos e economiza energia enquanto reduz as fontes de consumo e desperdício. Um exemplo é a reutilização das garrafas de vidro, pois é mais fácil lavá-las e reutilizá-las do que fabricar novas. Neste tipo de economia o principal objetivo é maximizar o valor em cada processo no ciclo de vida do produto (STAHEL *et al.*, 2016).

Além do mais, a economia circular pode ser dividida em dois grandes grupos: o primeiro consiste em estender a vida do produto por meio de reparo, remanufatura e melhorias. O segundo é a transformação do produto por meio da reciclagem, por exemplo (SEHNEM *et al.*, 2019).

2.3.1 Economia circular por meio da geração de energia elétrica

Por meio da expansão da utilização de energias renováveis nos últimos anos e a diminuição da dependência de energia gerada a partir de fontes finitas, demonstrase que as organizações buscam utilizar a energia de uma maneira mais eficiente para que o sistema se torne mais autossustentável (GALLAGHER *et al.*, 2017; OBRECHT, 2021).

Para que um sistema seja autossustentável é preciso analisar se a partir de sua operação ele irá manter ou expandir as opções ou escolhas de quando ele começou (ZELENY, 1997).

Aliado aos avanços tecnológicos, como os painéis solares e equipamentos de armazenamento de energia, abriu-se várias oportunidades em direção à economia circular no ramo de eletricidade (OBRECHT, 2021).

Quando se analisa os recursos que tornaram a economia circular pode-se dividir em dois tipos: físico e digital. O físico conta com redes de infraestrutura, plantas de energia, painéis solares, dentre outros. Já, os recursos digitais são as métricas inteligentes de informação, demanda, logística e informação dentre outros (MONTAKHABI *et al.*, 2020).

Tratando-se dos recursos digitais, o compartilhamento de informações faz com que o mercado saia do modelo tradicional (linear) em que eles estejam ligados aos seus recursos e os novos modelos de economia consigam se expandir, conectando de uma maneira sustentável a organização e o meio ambiente (MONTAKHABI *et al.*, 2021).

Os modelos de negócio emanados da economia circular envolvem três funções fundamentais: design circular, uso circular e recuperação circular (GENTILINI; SALT, 2019). No design circular, é imperativo que o desenvolvimento de um produto seja pensado em seu fim de vida útil, como painéis solares que incluam a oportunidade potencial de reciclagem (MATHUR *et al.*, 2020). O uso circular implica no uso de plataformas P2P para comercialização de energia, como o uso de *smart grids* com plataformas de mercado. Já a recuperação circular envolve o desenvolvimento efetivo de monitoramento, coleta, distribuição e reciclagem de produtos que permitam a geração de receita pela comunidade (FARRELL *et al.*, 2020; MATHUR *et al.*, 2020).

O modelo P2P de troca de eletricidade é uma área promissora para ir de encontro com a sustentabilidade no mercado elétrico e permite que governos e empresas desenvolvam modelos de negócios modernos que providenciem uma melhor performance ambiental, social e econômica por meio da redução de desperdícios (GENTILINI; SALT, 2019).

Inovações como a tecnologia Blockchain possibilitam a criação de novos modelos onde é possível a promoção da economia circular por meio da *tokenização* da energia elétrica e de estruturas computacionais que permitam transações P2P entre os participantes.

2.4 Tecnologia Blockchain

A Blockchain é uma combinação de tecnologias que suportam um sistema distribuído de banco de dados, mantido e gerido de forma descentralizada e

compartilhada, por meio de uma rede P2P onde os participantes são responsáveis por manter a base de dados confiável e segura (MARINO *et al*, 2019).

Uma *Distributed Ledger Technology* (DLT) na percepção do Banco Mundial é um tipo de sistema que permite que dados sejam gravados por meio de transações sincronizadas e compartilhadas em uma rede distribuída, sendo assim, a Blockchain é um tipo específico de DLT que transmite dados em pacotes conhecidos como *blocks* (blocos), conectados por métodos criptográficos e algorítmicos para sincronizar os dados na rede distribuída (NATARAJAN, KRAUSE, GRADSTEIN, 2017).

Para a *Internation Telecommunication Union* (ITU) a Blockchain é a implementação de DLT mais conhecida, onde os *nodes* (nós) na rede, representam elementos que desempenham funções de gravar dados digitalmente organizados como uma cadeia de blocos crescente e com uma vinculação criptográfica entre blocos, garantindo o consenso sem a necessidade de uma autoridade central (ITU-T, 2019).

A Figura 1 ilustra o mecanismo de uma DLT, onde cada *node* em uma rede P2P possui uma cópia inteira dos dados, e o algoritmo de consenso permite que os *nodes* validem e compartilhem de forma coletiva a consistência dos dados.

Figura 1 – DLT: todos os participantes compartilham e validam a rede



Fonte: Adaptado de Natarajan, Krause e Gradstein (2017)

Segundo Maldonado (2018), a Blockchain é um conjunto de tecnologias que incluem a estrutura de dados encadeados, livro-razão distribuído, criptografia de chave pública, e mecanismos de consenso, tendo potencial para impactar muitos aspectos do dia a dia, desde pagamentos bancários, *big data* e contratos inteligentes.

Há três tipos principais de Blockchain: redes públicas que são amplas e qualquer um pode fazer parte delas em qualquer nível de atividade, redes permissionadas que são visíveis ao público, mas sua participação é controlada, e redes privadas que são compartilhadas entre grupos confiáveis e podem não ser visíveis ao público (LAURENCE, 2019). Segundo Bashir (2018), existe ainda o conceito de redes semi-descentralizadas, ou híbridas, onde parte da Blockchain é privada e controlada por um grupo de indivíduos, e parte é público e qualquer um pode participar.

Para Antonopoulos e Wood (2018) Redes Blockchain públicas normalmente possuem alguns componentes em comum:

- Uma rede P2P conectando participantes e propagando transações e blocos de transações verificadas;
- Mensagens em forma de transação, que representam uma transição de estado;
- Um conjunto de regras de consenso, admitindo o que é uma transação e o que torna uma transição de estado válida;
- Uma máquina de estado que processa as transações de acordo com as regras de consenso;
- Uma cadeia de blocos criptograficamente seguros, que haja como um diário de todas as transições de estado verificadas e aceitas;
- Um esquema de incentivo teoricamente sólido (como PoW e recompensa por bloco) para proteger economicamente a máquina de estado em um ambiente aberto;
- Ao menos um software cliente de código aberto para uso das implementações acima.

O surgimento da tecnologia foi em 2008 com o documento “Bitcoin: A Peer-to-Peer Electronic Cash System”⁴, com a proposta da criação de um dinheiro eletrônico com ênfase em sanar deficiências inerentes ao modelo baseado em confiança nas instituições financeiras (NAKAMOTO, 2008). Desse modo, o Bitcoin (BTC) é um sistema de pagamento eletrônico baseado em prova criptográfica, em vez de confiança, permitindo transações entre duas partes sem a necessidade de um

⁴ Pode ser acessado na íntegra em <https://bitcoin.org/bitcoin.pdf>

terceiro confiável (NAKAMOTO, 2008). A definição do Bitcoin se tornaria o fenômeno comumente designado como “moeda digital” ou “criptomoeda”.

Uma moeda é um bem empregado como meio de pagamento em determinada transação, sejam notas bancárias, transferências eletrônicas ou títulos de créditos, entre outros (GHIRARDI, 2020). Seu conceito é conhecido na dinâmica das funções que desempenha: reserva de valor, unidade de valor e meio de pagamento, porém, até que se adquirisse esta visão funcional, a moeda se modificou, adequando-se à realidade social de diferentes épocas, onde o surgimento das criptomoedas, ligado ao avanço tecnológico que lhes dá sustentação. Para Ghirardi (2020), a Blockchain, revela avanços sem precedentes cujo impacto justifica a investigação sobre a possibilidade da emergência de outros bens capazes de preencher as funções econômicas da moeda e de como é utilizada.

O fenômeno iniciado com a criação do Bitcoin se expandiu gradualmente, e foi sendo replicado por outros programadores que passaram a desenvolver tecnologias semelhantes para transferir suas próprias criptomoedas, adicionando vários concorrentes ao Bitcoin, como o Ethereum (ETH), Litecoin (LTC), Ripple (XRP), Cardano (ADA), entre outros.

A Blockchain foi construída considerando quatro principais características arquiteturas: descentralização da computação, segurança das operações, integridade dos dados e imutabilidade de transações (ROLIM, TOSHIOKA, 2021), e constrói um arcabouço tecnológico que permite o seu uso para além da transferência de valores, como o desenvolvimento de aplicações em áreas da indústria e do setor público como a administração pública (BELCHIOR; VASCONCELOS; CORREIA, 2019), economia colaborativa e *crowdfunding* (ARNOLD *et al.*, 2019), rastreamento e cadeia de suprimentos (HEPP *et al.*, 2018), votação e transparência (OSGOOD, 2016), autenticação e controle de acesso (CRUZ; KAJI; YANAI, 2018)

Para Laurence (2019), a utilidade real do uso de alguma forma de Blockchain é quando existe a necessidade de compartilhamento da informação com grupos nos quais não se confiam totalmente, onde os dados precisam ser fiscalizados ou correm o risco de serem comprometidos interna ou externamente. O funcionamento da Blockchain depende de um conjunto de tecnologias definidas nas subseções seguintes.

2.4.1 Chaves, Endereços e Carteiras

A propriedade de uma criptomoeda como o Bitcoin é estabelecida por chaves digitais, endereços e assinaturas (BASHIR *et al.*, 2018). As chaves digitais não são armazenadas na rede, em vez disso são criadas e armazenadas pelo usuário final em um arquivo ou banco de dados chamado *wallet*, e não necessitam de nenhuma referência à Blockchain ou acesso à Internet (ANTONOPOULOS, 2010). Estas chaves são dispostas em pares, consistindo de uma chave pública e uma chave privada. Esta junção disponibiliza propriedades muito interessantes para redes descentralizadas, incluindo controle e confiança, atestado de propriedade e um modelo de segurança à prova de criptografia (LAURENCE, 2019).

A criptografia de chave pública é uma fundação matemática para a segurança da informação, e desde sua invenção algumas funções matemáticas como o uso de multiplicação de curva elíptica e potência de números primos se incorporaram para criar funções praticamente irreversíveis, que são fáceis de calcular em uma direção e inviável de calcular na direção oposta. Estes artifícios proporcionam a criação de senhas e assinaturas digitais infalsificáveis (ANTONOPOULOS, 2010).

Segundo Katz e Lindell (2015) este tipo de criptografia de encriptação segue o esquema de uma tripla de algoritmos de tempo polinomial probabilístico (*Gen*, *Enc*, *Dec*) em que:

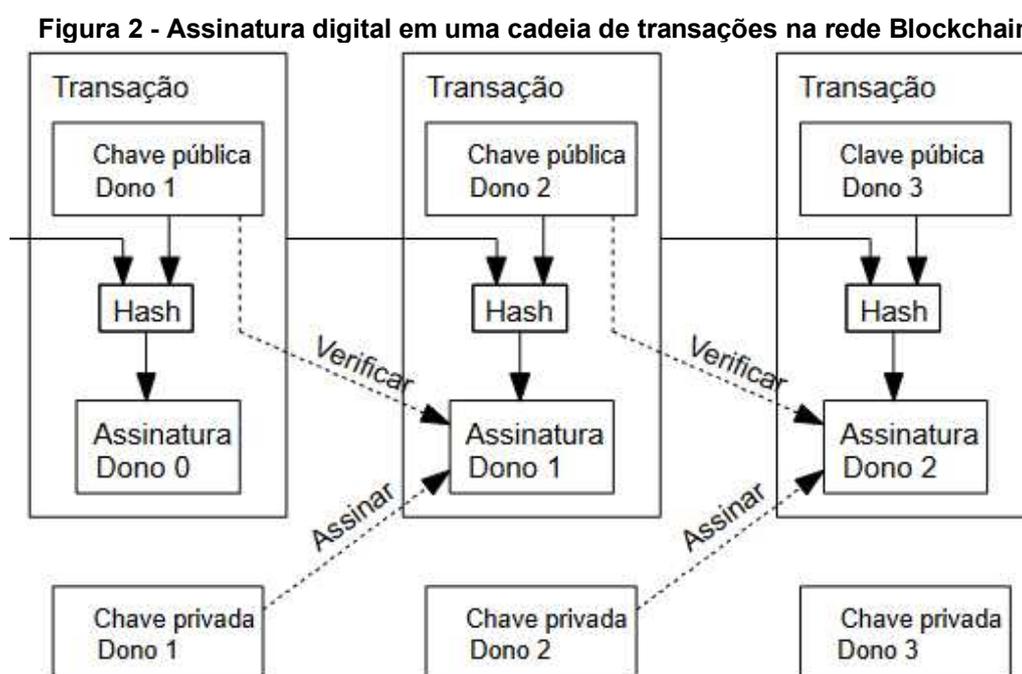
- *Gen* é o algoritmo de geração de chaves que recebe o parâmetro de segurança 1^n e como saída os pares (pk, sk) , sendo a chave pública e a chave privada respectivamente;
- O algoritmo de encriptação *Enc* que recebe a chave pública (pk) e a mensagem m para entregar como saída um texto cifrado c , dessa forma $c \leftarrow Enc_{pk}(m)$;
- A decifração determinística do algoritmo *Dec* recebe a chave privada sk e o texto cifrado c , e como saída a mensagem $m := Dec_{sk}(c)$ ou um símbolo especial \perp denotando falha.
- É requerido então que tenha para qualquer (pk, sk) gerado por $Gen(1^n)$ um $Dec_{sk}(Enc_{pk}(m)) = m$ para qualquer mensagem m .

Na rede Blockchain, o uso do par de chaves é utilizado para controlar e acessar a criptomoeda, e a chave pública é utilizada para recebimento de maneira

que desse relacionamento matemático entre chave pública e privada, qualquer nó da rede pode, por meio da chave pública e da assinatura de uma transação, verificar e aceitar a transação como válida (ANTONOPOULOS, 2010).

2.4.2 Cadeia de Blocos

A Blockchain ou cadeia de blocos em tradução livre é um sistema em cadeia de assinaturas digitais de *hash*, que permite transações de forma descentralizada, onde as transferências de valores entre proprietários surgem a partir da assinatura da transação anterior e a chave pública do dono da próxima transação como demonstrado na Figura 2.



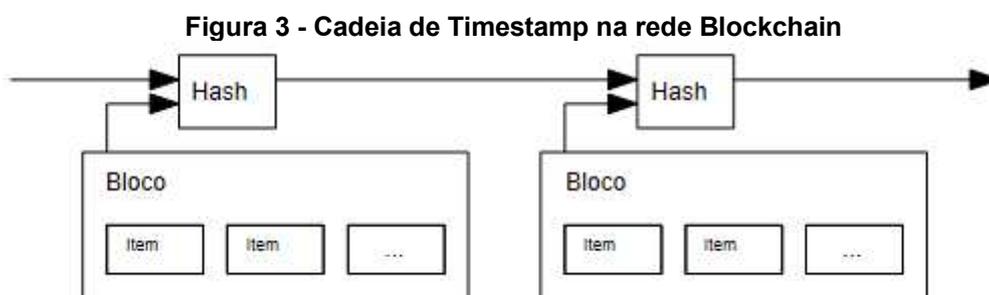
Fonte: Adaptado de Nakamoto (2008)

Um *hash*, também conhecido por *checksum* ou função resumo, é uma função matemática responsável por transformar um determinado dado de entrada de tamanho variável em uma sequência de caracteres hexadecimais de tamanho fixo, essa característica favorece a utilização de *hash* como validador de integridade, uma vez que comporta-se como uma "impressão digital" do arquivo, e caso a entrada seja alterada em um *bit*, o valor do *hash* sofrerá mudanças que indicam alterações na integridade do dado (LIMA, 2015).

O gasto duplo acontece quando um usuário consegue gastar a mesma moeda digital em duas transações diferentes, segundo Hoepman (2008), o gasto duplo é um

grande inconveniente que permite que um usuário desonesto gaste de maneira rápida e múltipla uma única moeda sem ser detectado.

Esta preocupação é sanada com uso da Blockchain, para isso, a rede precisa estar ciente de todas as transações anunciadas publicamente, e alcançar esse objetivo sem um terceiro confiável com auxílio de um servidor de carimbo de tempo ou *timestamp* (hora universal atual desde janeiro de 1970), que trabalha gerando um *hash* de um bloco de itens, publicando-o para que os participantes possam comprovar e atestar um histórico único de transações na cronologia correta (NAKAMOTO, 2008). Cada *timestamp* inclui o anterior em seu *hash*, encadeando-os de maneira a reforçar os *timestamps* mais antigos como na Figura 3.



Fonte: Adaptado de Nakamoto (2008)

Este processo garante a imutabilidade dos dados transacionados na rede.

2.4.3 Prova de trabalho

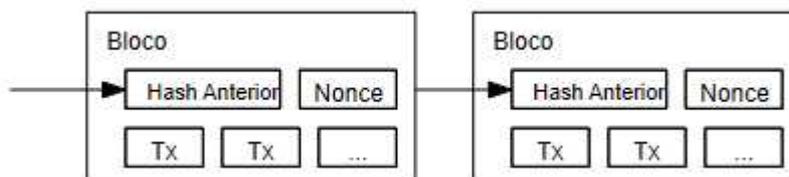
Para validar o servidor *timestamp* distribuído de forma P2P é utilizado um sistema de prova de trabalho, que demanda esforço computacional utilizando o algoritmo SHA-256 para o cálculo de um *hash* que comece com um número de bits zero requerido (ANTONOPOULOS, 2010).

A prova de trabalho ou *Proof of Work* (PoW) é um modelo de segurança impulsionado por incentivos que envolve encontrar um *nonce* de entrada cujo resultado seja abaixo do limite de dificuldade estipulado pela rede, os algoritmos PoW possuem vantagens que impedem encontrar um *nonce* por outra alternativa que não seja enumerar as possibilidades, enquanto sua verificação é uma solução trivial e barata (ETHEREUM HOMESTEAD, 2016).

A PoW incrementa um *nonce* no bloco, um número arbitrário que poderá ser utilizado uma só vez, até que seja encontrado um valor correspondente ao *hash* do

bloco com a quantidade necessária de bits zero (ANTONOPOULOS, 2010). Esse mecanismo é ilustrado na Figura 4 e segundo Nakamoto (2008), exige que seja despendido esforço computacional para satisfazer a prova de trabalho, e com o encadeamento dos blocos, o trabalho para mudar um bloco implicaria em refazer todo o esforço computacional para os blocos após ele.

Figura 4 - Encadeamento de Blocos



Fonte: Adaptado de Nakamoto (2008)

O algoritmo PoW resolve a determinação na tomada de decisão da maioria de nós na rede, e faz com que a cadeia mais longa seja representada como a cadeia correta e cadeias concorrentes sejam rejeitadas pela maioria (NAKAMOTO, 2008).

Todo o nó participante da rede pode ser um validador, estes agentes validadores que participam de modelos de prova de trabalho para validação são conhecidos como mineradores, esta terminologia é originada do contexto da mineração de metais preciosos, que assim como as criptomoedas, possuem escassez e o seu volume total é acrescido apenas pelo processo de mineração (ETHEREUM HOMESTEAD, 2016).

2.4.4 Nós

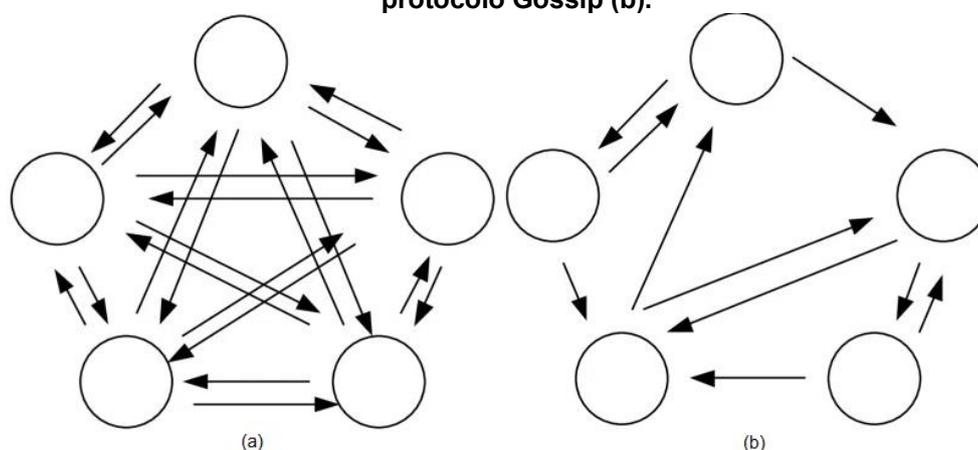
Um *node* ou nó da rede é de modo geral um computador conectado à rede, é responsável por manter e distribuir cópias dos registros da Blockchain garantindo a manutenção confiável da rede, isso porque quanto mais nós existirem mais comparações entre nós poderão ser feitas a fim de distribuir a cópia correta da Blockchain (NAKAMOTO, 2008).

De acordo com Bashir (2018), uma transação começa a partir de um nó, que cria e assina a transação com uma chave privada, normalmente, nestas transações estão estruturas de dados que consistem em alguma lógica de transferência de valor, regras de relevância, endereços de origem e destino e informações de validação. A transação é propagada usando um protocolo de inundamento de rede conhecido

como Gossip, permitindo que os demais nós na rede validem a transação baseando-se nos critérios preestabelecidos.

O protocolo Gossip possui uma menor redundância na propagação dos dados em relação a redes sobrepostas totalmente conectadas, onde todos os nós estão diretamente em contato (LUK *et al.*, 2013). Na Figura 5 observa-se a diferença de topologia utilizada para propagação de dados dentro de um grupo de comunicação para os dois tipos de enfoque.

Figura 5 - Comparação da topologia de redes sobrepostas totalmente conectadas (a) e protocolo Gossip (b).



Fonte: Adaptado de Luk *et al.* (2013)

Caso dois nós transmitam diferentes versões do bloco seguinte, alguns nós receberão um ou outro primeiro, mas salvarão o outro ramo caso ele se torne mais longo, a prova de trabalho quando resolvida decidirá a favor do bloco mais longo e forçará os nós que estavam trabalhando no outro ramo que mudem para o mais longo. Os nós podem se desconectar da rede sem ônus, apenas aceitando a cadeia de prova de trabalho como comprovação do que aconteceu enquanto eles estavam ausentes (NAKAMOTO, 2008).

2.5 Ethereum Blockchain

Na perspectiva da ciência da computação, a Ethereum (ETH) é uma máquina de estado determinística, mas praticamente ilimitada consistindo em um estado único acessível globalmente e uma máquina virtual que aplica mudanças a esse estado. É a segunda geração de sistemas Blockchain, proposto por Vitalik Buterin em 2013, e diferentemente do Bitcoin que possui uma linguagem de script muito limitada, este foi projetado para ser uma Blockchain programável com uma linguagem Turing-completa,

que disponibiliza uma máquina virtual capaz de executar códigos de arbitrária e ilimitada complexidade em uma infraestrutura computacional de código aberto, global e descentralizada (ANTONOPOULOS; WOOD, 2018).

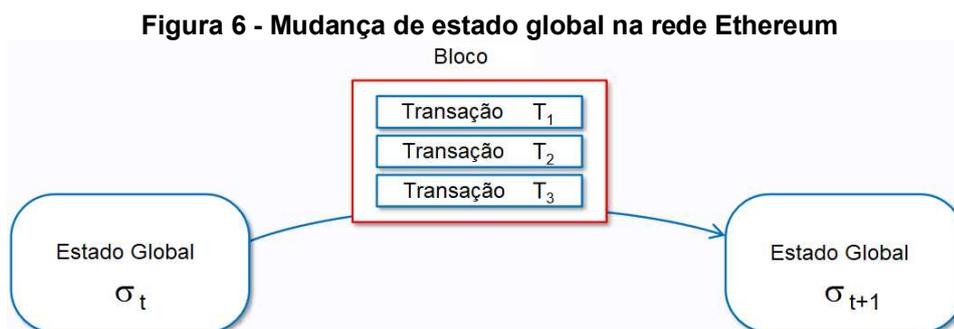
O bloco gênese (bloco de nº 0) da rede ETH foi lançado em julho de 2015 por Vitalik Buterin, Gavin Wood e Jeffrey Wilcke, disponibilizando um novo paradigma em relação à execução de aplicativos em um único computador. O seu funcionamento foi descrito no *whitepaper* “*A Next-Generation Smart Contract and Decentralized Application Platform*”, lançando uma nova geração que ficou conhecida como Blockchain 2.0, onde cada nó na rede possui uma *Ethereum Virtual Machine* (EVM), uma máquina de estado virtual baseada em pilha, que executa *bytecodes*. Os programas EVM são chamados *smart contracts* ou contratos inteligentes, escritos em linguagem de alto nível (Solidity) e compilados para *bytecode* para a execução na EVM.

Sua estrutura de dados é armazenada localmente em cada nó da rede como um banco de dados de armazenamento valor-chave (LevelDB⁵) que contém o sistema de estados e as transações serializadas em uma estrutura Merkle Patricia Tree, proporcionando eficiência na consulta, deleção e inserção de dados em uma complexidade logarítmica de $O(\log(n))$ (WARD,2020).

A principal característica que torna a Blockchain da ETH vantajosa é sua linguagem de programação Turing-completa, possibilitando o desenvolvimento de todas as aplicações possíveis com uso de linguagens de programação regulares, mas com vantagens de segurança que a Blockchain traz (LAURENCE, 2019).

Ethereum pode ser visto como uma máquina de estados baseadas em transação, onde as transações são operações atômicas que representam um arco válido entre dois estados, estas transações são agrupadas em blocos, que alteram o estado global da rede (TAKENOBU, 2018). A Figura 6 representa a mudança de estado global σ_t resultante das transações agrupadas no bloco.

⁵ Pode ser acessado em: <https://dbdb.io/db/leveldb>



Fonte: Adaptado de Takenobu (2018)

A rede utiliza o Ether como criptomoeda para a execução de qualquer código na Blockchain, suportado por um algoritmo PoW conhecido como Ethash, um derivado do algoritmo Dagger-Hashimoto, neste não há determinação de uma quantidade inicial de zeros para o *hash* (ANTONOPOULOS; WOOD, 2018).

De acordo com Laurence (2019), o ETH é o melhor ecossistema para o desenvolvimento de aplicações descentralizadas como *tokens* e organizações autônomas descentralizadas (DAO), tem uma documentação muito bem elaborada e uma comunidade ativa do Github na participação da evolução da rede com o emprego das *Ethereum Request for Comments* (ERC) e *Ethereum Improvement Proposal* (EIP), documentos que norteiam o desenvolvimento da rede e permitem que padrões sejam estabelecidos pela comunidade, tornando-os mais acessíveis.

Volgelsteller e Buterin (2015, tradução livre) manifestam a motivação para o desenvolvimento de padrões: “Uma interface padrão permite que qualquer *token* na Ethereum seja reutilizado em outras aplicações, de carteiras a corretoras descentralizadas”.

Para o desenvolvimento de *tokens* na rede Ethereum, foi instituído o padrão de *smart contract* baseado no documento aberto EIP-20⁶ do repositório da Ethereum no Github nomeado ERC20. O padrão ERC20 descreve várias propriedades, regras e atributos de um novo *token*, nestes estão incluídos o suprimento total, balanço total e funções de transferência, aprovação e rendimento (BASHIR, 2018).

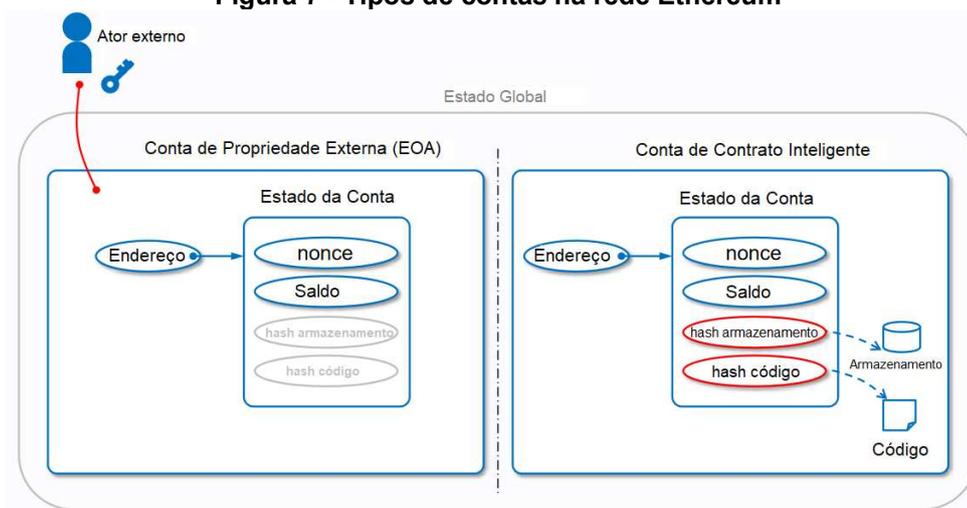
⁶ A interface padrão de *tokens* pode ser acessado na íntegra em <https://github.com/ethereum/EIPs/blob/master/EIPS/eip-20.md>

2.5.1 Contratos inteligentes

A primeira aparição do termo *smart contract* surgiu no artigo nomeado *Formalizing and Securing Relationships on Public Networks*, teorizado por Nick Szabo, em 1997, que o descreveu como um protocolo de transação eletrônica que executa os termos de um contrato. O objetivo geral é satisfazer condições contratuais comuns, minimizar exceções maliciosas ou acidentais e minimizar a necessidade de intermediários confiáveis (SZABO, 1997).

Na rede ETH, o termo *smart contract* refere-se a um programa de computador imutável que funcione deterministicamente em uma EVM. Existem dois tipos de contas na rede ETH: as contas de propriedade externa (EOA) e as contas de contratos. As EOAs são controladas pelos usuários, com auxílio de softwares externos que se conectam a rede ETH e não possuem nenhum armazenamento de dados ou código associado. Suas transações são assinadas criptograficamente por uma chave privada como no Bitcoin, já as contas de contrato são controladas pelos códigos do programa (contrato inteligente) de forma predeterminada e não possuem chave privada (ANTONOPOULOS; WOOD, 2018). Uma conta dentro do estado global da rede Ethereum é um mapeamento entre endereços e o estado da conta, que poderá conter um armazenamento de dados e códigos da EVM. A Figura 7 ilustra os dois tipos de contas possíveis dentro do estado global da rede.

Figura 7 - Tipos de contas na rede Ethereum



Fonte: Adaptado de Takenobu (2018)

Segundo Bashir (2018), um *smart contract* não depende de uma Blockchain para existir, no entanto, devido aos benefícios de segurança da rede, a Blockchain

tornou-se o padrão de descentralização para a execução de uma plataforma para *smart contracts*.

Cada contrato pode ser identificado por um endereço Ethereum que é derivado de uma transação de criação de contrato, estas podem somente ser iniciadas por uma EOA, que por sua vez não terá nenhum tipo de privilégio a nível de protocolo pela criação do contrato, mas poderá especificá-lo em sua codificação (ANTONOPOULOS; WOOD, 2018).

2.5.2 Taxas e gas na rede Ethereum

Gas é essencial na rede Ethereum, e é o “combustível” que permite a execução de operações na rede, a fim de evitar problemas de abusos e de contornar problemas decorrentes da sua natureza Turing completa, toda computação programável na rede está sujeita a taxas (WOOD, 2022).

Gas é o nome da taxa de execução que o remetente de uma transação paga por cada operação feita na rede Ethereum, o gas é adquirido em Ether pelos mineradores que executam o código, no entanto, gas e Ether são desacoplados deliberadamente visto que o gas representa as unidades de computação, enquanto o preço do Ether flutua de forma generalizada como resultado das forças de mercado (ETHEREUM HOMESTEAD, 2016).

A tabela de taxas é especificada em unidades de gas para o uso da EVM, e inclui a criação de contratos, chamadas de mensagem, utilização e acesso ao armazenamento de contas e execução de operações na máquina virtual, desse modo, quanto mais intenso seu uso, mais unidades de gas são necessárias para sua execução.

A Tabela 2 representa os valores de G sendo uma tupla de valores escalares correspondentes ao preço relativo em gas de uma série de operações abstratas que uma transação pode efetuar.

Tabela 2 - Tupla de valores em gas e operações possíveis em uma EVM

Nome	Valor (gas)	Descrição
<i>Gzero</i>	0	Operações do conjunto <i>Wzero</i>
<i>Gjumpdest</i>	1	Quantidade de gas paga para uma operação JUMPDEST
<i>Gbase</i>	2	Quantidade de gas paga para operações do conjunto <i>Wbase</i>
<i>Gverylow</i>	3	Quantidade de gas paga para operações do conjunto <i>Wverylow</i>

(Continua)

Tabela 2 - Tupla de valores em gas e operações possíveis em uma EVM

(Conclusão)

Nome	Valor (gas)	Descrição
<i>Gcodedeposit</i>	200	Pago por <i>byte</i> para que a operação CREATE tenha sucesso ao colocar o código no estado
<i>Glow</i>	5	Quantidade de gas paga para operações do conjunto <i>Wlow</i>
<i>Gmid</i>	8	Quantidade de gas paga para operações do conjunto <i>Wmid</i>
<i>Ghigh</i>	10	Quantidade de gas paga para operações do conjunto <i>Whigh</i>
<i>Gwarmaccess</i>	100	Custo para acesso à uma conta quente ou acesso ao armazenamento
<i>Gaccesslistaddress</i>	2400	Custo para aquecer uma conta com a lista de acesso
<i>Gaccessliststorage</i>	1900	Custo para aquecer um armazenamento com a lista de acesso
<i>Gcoldaccountaccess</i>	2600	Custo para acesso em uma conta fria
<i>Gcoldslod</i>	2100	Custo para acesso a um armazenamento frio
<i>Gsset</i>	20000	Custo da operação SSTORE quando o armazenamento é setado de qualquer valor para zero
<i>Gsreset</i>	2900	Pago pela operação SSTORE quando o valor do armazenamento continua intacto ou setado para zero
<i>Gselfdestruct</i>	5000	Quantidade de gas paga para a operação SELFDESTRUCT
<i>Gcreate</i>	32000	Custo da operação CREATE
<i>Gcallvalue</i>	9000	Pago para um valor não-zero transferido como parte de uma operação CALL
<i>Gcallstipend</i>	2300	Estipendio para um contrato chamado subtraído de <i>Gcallvalue</i> para uma transferência de valor não-zero
<i>Gnewaccount</i>	25000	Pago para uma operação CALL ou SELFDESTRUCT que cria uma conta
<i>Gexp</i>	10	Pagamento parcial por uma operação EXP
<i>Gexpbyte</i>	50	Pagamento parcial quando multiplicado por um número de bytes no expoente da operação EXP
<i>Gmemory</i>	3	Pago para cada palavra adicional ao expandir a memória
<i>Gtxcreate</i>	32000	Pago para cada transação de criação de contrato
<i>Gtxdatazero</i>	4	Pago para cada byte zero do dado ou código para uma transação
<i>Gtxdata nonzero</i>	16	Pago para cada byte não-zero do dado ou código para uma transação
<i>Gtransaction</i>	21000	Pago por cada transação
<i>Glog</i>	375	Pagamento parcial para uma operação LOG
<i>Glog^{data}</i>	8	Pago por cada byte em uma operação LOG
<i>Glog^{topic}</i>	375	Pago por cada tópico de uma operação LOG
<i>Gkeccak256</i>	30	Pago por cada operação KECCAK256
<i>Gkeccak256word</i>	6	Pago por cada palavra de entrada de dado para uma operação KECCAK256
<i>Gcopy</i>	3	Pagamento parcial por operação COPY, multiplicado pelas palavras copiadas, arredondado para cima
<i>Gblockhash</i>	20	Pagamento por cada operação BLOCKHASH

Fonte: Adaptado de Wood (2022)

Cada transação tem uma quantidade máxima especificada de gas, denominada *gasLimit*, este valor é indicado pelo remetente e representa a quantidade

máxima implicitamente adquirida do saldo da conta do remetente para efetivar a transação, este limite é reembolsado caso haja gas não utilizado no fim da transação, mas também poderá ser invalidada caso o limite seja menor que o mínimo necessário para execução dos cálculos na EVM ou a conta não tenha saldo suficiente para sustentar a transação (MORALIS, 2022).

Toda transação requer a inclusão do limite de gas e o valor que será pago por unidade de gas, os mineradores são os coletores das taxas e escolhem incluir a transação no bloco ou não, priorizando transações cujas taxas são maiores e alocando as transações com taxas menores para os blocos seguintes (ETHEREUM HOMESTEAD, 2016).

De acordo com Wood (2022), a transição de estado na EVM, que é definido por uma transação sucedida deve passar por um teste inicial de validade intrínseca que incluem:

- A transação deve formar corretamente a função de codificação em *byte-array* sem bytes adicionais à direita;
- A assinatura da transação deve ser válida;
- O *nonce* da transação deve ser válido e equivalente ao *nonce* corrente da conta do remetente;
- O limite de gas (*gasLimit*) não deve ser menor que o gas intrínseco g_0 necessário para a transação;
- O saldo da conta do remetente deve conter ao menos o custo inicial de pagamento da transação.

O gas intrínseco é a quantidade de gas que a transação requer para pagar a execução de uma transação. De acordo com Wood (2022) o cálculo do gas intrínseco g_0 é definido pela Equação 1

$$g_0 \equiv \sum_{i \in T_i T_d} \begin{cases} Gtxdatazero & \text{se } i = 0 \\ Gtxdatanonzero & \text{se } i > 0 \end{cases} + \begin{cases} Gtxcreate & \text{se } T_t = \emptyset \\ 0 & \text{senão} \end{cases} + Gtransaction \quad (1)$$

Em que, T_i, T_d , representam a série de bytes de dados associado a transação e/ou inicialização do código da EVM, e dependendo do propósito da transação, é adicionado $Gtxcreate$ caso seja uma criação de contrato inteligente, ou adicionará 0 caso seja resultado de um código EVM, por fim soma-se o resultado ao custo de transação. A quantidade de gas remanescente g é calculada pela diferença entre a

dedução da quantidade básica requerida para pagar pela existência da transação e o $gasLimit (T_g)$, e pode ser compreendida pela Equação 2:

$$g \equiv T_g - g_0 \quad (2)$$

A unidade de medida utilizada para o cálculo do valor do gas é denominado gigawei ($gwei$). Um wei é a menor unidade existente na rede Ethereum, desse modo, a Tabela 3 ilustra a relação de valores para wei .

Tabela 3 - Relação de unidades de wei na rede Ethereum

Unidade	Valor em wei	Wei
wei	$1\ wei$	1
Kwei (kilowei)	$1 \cdot 10^3\ wei$	1.000
Mwei (megawei)	$1 \cdot 10^6\ wei$	1.000.000
Gwei (gigawei)	$1 \cdot 10^9\ wei$	1.000.000.000
Microether (μ ETH)	$1 \cdot 10^{12}\ wei$	1.000.000.000.000
Milliether (mETH)	$1 \cdot 10^{15}\ wei$	1.000.000.000.000.000
Ether (ETH)	$1 \cdot 10^{18}\ wei$	1.000.000.000.000.000.000

Fonte: Adaptado de Skvorc (2018).

Para estimar o custo total em Ether de uma transação é preciso considerar dois fatores: O gas utilizado (G_u), que corresponde a soma de todo o gas para toda a operação executada, e o preço do gas (G_p), valor especificado pelo remetente na construção da transação (ETHEREUM HOMESTEAD, 2016). De forma geral a Equação 3 do custo total em $gwei (C_t)$ da transação é representada por:

$$\overline{C_t} = G_u \cdot G_p \quad (3)$$

Em 5 de agosto de 2021 foi implementado na rede Ethereum a atualização denominada London Upgrade. Um dos principais benefícios é permitir uma maior previsibilidade aos usuários pela revisão do mecanismo de taxa de transação, introduzindo uma melhor estimativa da taxa, resultando em maior eficiência no uso das taxas na rede (BUTERIN *et al.* 2019).

A implementação do EIP-1599⁷ na atualização fez os mecanismos de taxa de transação mais previsíveis, cada bloco passou a conter uma taxa base (*base Fee*), que corresponde ao valor mínimo calculado pela rede, em $gwei$ estipulado para a inclusão da transação no bloco corrente, baseado na demanda por espaço no bloco (WOOD, 2022).

⁷ Pode ser acessado na íntegra em <https://github.com/ethereum/EIPs/blob/master/EIPS/eip-1559.md>

A limitação de tamanho máximo de um bloco, que antes era de 12,5M gas foi aumentada para 25M gas, e o valor de 12,5M passou a ser o valor alvo para o tamanho de um bloco (WOOD, 2022).

A taxa base de um bloco corrente é ajustada pela comparação do tamanho do bloco anterior (total de gas acumulado no bloco) com um tamanho de bloco alvo determinado (MORALIS, 2022).

Caso o tamanho do bloco anterior seja maior que o tamanho alvo determinado de 12,5M de gas, o bloco corrente terá um acréscimo em sua taxa base, alocando transações cujas taxas são inferiores a taxa base para um bloco futuro, inversamente, blocos com o tamanho menor que a taxa alvo proporcionarão ao bloco seguinte um decréscimo em sua taxa base (ROUGHGARDEN, 2020).

De acordo com Roughgarden (2020) a regra de ajustamento que computa a taxa base r_{cur} do bloco corrente depende de dois fatores: a taxa base do bloco antecessor r_{pred} e seu tamanho s_{pred} , desse modo é possível identificar a taxa base pela Equação 4, onde s_{target} denota o tamanho do bloco alvo.

$$r_{cur} = r_{pred} * \left(1 + \frac{1}{8} * \frac{s_{pred} - s_{target}}{s_{target}}\right) \quad (4)$$

A taxa base acumulada no bloco é queimada, ou seja, deixam de existir na rede, e os usuários passam a selecionar uma taxa de prioridade (*priority Fee*) na transação, que compensará os mineradores para executar e propagar a transação do usuário na rede por ordem de prioridade. Com essa atualização, calcular o custo total em *gwei* de uma transação é interpretada pela Equação 5:

$$C_t = g_0 * (baseFee + priorityFee) \quad (5)$$

A EIP-1559 oferece como principal benefício uma estimativa fácil da taxa de transação, mas as mudanças no design também proporcionam uma menor variância nas taxas devido a flexibilidade do tamanho do bloco.

A queima das taxas base em cada bloco proporciona um decrescimento na inflação da rede Ethereum, e se as taxas base das transações permanecerem altas, pode tornar-se até deflacionaria, o que torna o valor do ETH diretamente relacionado à intensidade do uso da rede (BUTERIN *et al.*, 2019).

2.6 Blockchain na comercialização de eletricidade

Na busca por alternativas para a comercialização direta de energia elétrica entre produtores e consumidores, junto a massificação da geração distribuída impulsionada pelos esforços globais para a descarbonização das matrizes elétricas fomentou-se o surgimento de iniciativas baseadas na tecnologia Blockchain, dentre as iniciativas o fomento para o crescimento das unidades de geração de energia renovável, em especial a distribuída, junto ao aumento do protagonismo cada vez mais presente pelos consumidores de energia elétrica que outrora passivos, passaram a participar do mercado de energia, seja na geração, comercialização ou criação de novos modelos de mercado (ROLIM; TOSHIOKA, 2021).

Diversas iniciativas têm explorado a tecnologia Blockchain por meio de projetos de pesquisa, pilotos e desenvolvimento de plataformas, envolvendo empresas, *startups* e organizações do setor elétrico. A seguir, são relacionadas algumas iniciativas de modelos de operação transacional descentralizados.

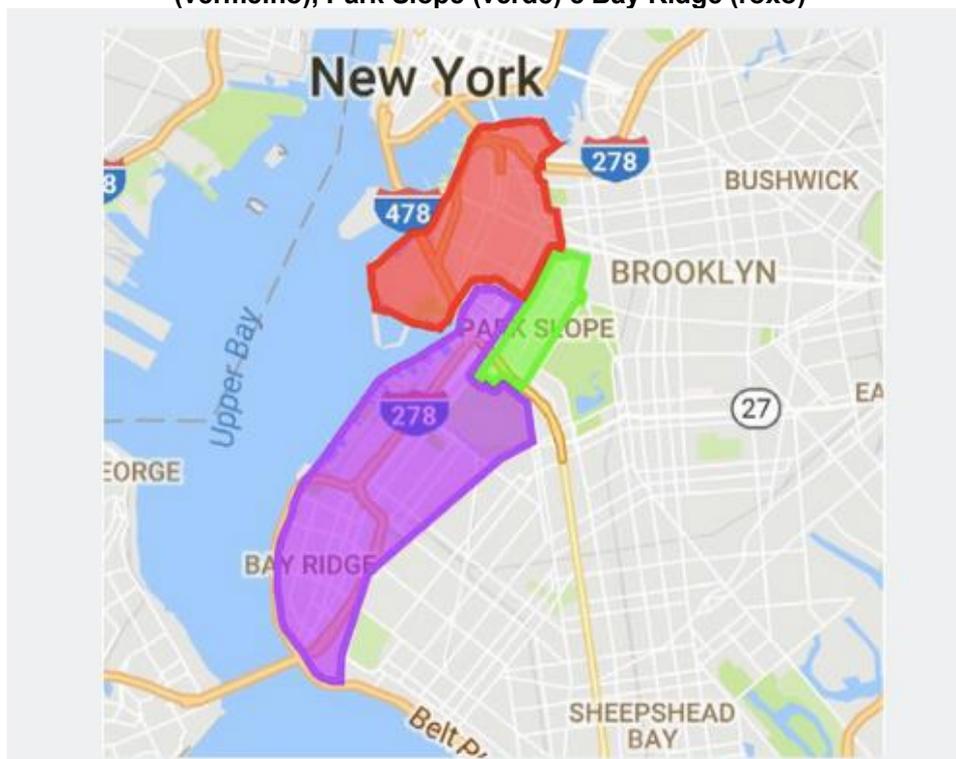
2.6.1 Brooklyn Microgrid

A experiência realizada no bairro do Brooklyn, na cidade de Nova Iorque (NY-USA) pela empresa LO3 Energy e ficou conhecida como BMG⁸, e é considerada um dos casos pioneiros envolvendo transações P2P utilizando Blockchain, e consistiu na criação da base comercial para a negociação de energia renovável produzida na região, pelos consumidores adotantes da geração distribuída (SOLAR EDITION, 2021).

A Figura 8 delimita a área de abrangência da experiência que teve a primeira transação realizada em junho de 2016.

⁸ Pode ser acessado em: <https://www.brooklyn.energy/>

Figura 8 - Area dos participantes da BMG nas três grids de distribuição: Borough Hall (vermelho), Park Slope (verde) e Bay Ridge (roxo)



Fonte: Adaptado de Solar Edition. (2021)

Este cenário criou um ambiente para avaliar a importância atribuída pelos participantes à energia limpa gerada por prosumidores locais, pertencentes à microrrede e fomentar iniciativas similares em outras regiões e arranjos maiores de consumidores. O ecossistema de mercado implementado envolve empresas de energia tradicionais, consumidores/produtores residenciais e comerciais, reguladores regionais e comunidades engajadas em projetos de energia renovável (BMG, 2016). O acesso dos participantes é suportado via sistemas e aplicativos móveis e por um *hardware* dedicado acoplado ao sistema de medição da unidade consumidora com interação direta com a rede Blockchain para envio e processamento das transações (SOLAR EDITION, 2021). O BMG adere o conceito de *Transactive Energy* da plataforma Exergy.

2.6.2 Exergy LO3 Energy

A empresa LO3 Energy⁹ desenvolveu com o uso de plataformas e produtos que se propõem a combinar a contabilidade digital descentralizada da Blockchain com

⁹ Pode ser acessado em: <https://lo3energy.com/>

métodos inovadores para a produção e capitalização de energia, considerando não somente o KWh como único atributo do serviço de suprimento de energia, mas também a origem de sua produção, assim, aspectos como a localização e acoplamento temporal dos momentos de consumo e geração e os atributos da fonte de geração passam a ter uma maior relevância na constituição de mercados descentralizados de forma P2P, onde fontes não-renováveis tendem a perder lugar neste novo mercado, sendo gradativamente substituída por matrizes energéticas que valorizem a sustentabilidade ambiental (KHALILI, 2021).

Neste conceito, a empresa criou a plataforma Exergy, uma rede permissionada apta a valer-se da infraestrutura de rede elétrica existente e operada pelas distribuidoras de energia para a formação de arranjos em que prosumidores e consumidores negociem livremente os produtos e os termos para atendimento de suas próprias demandas energéticas, contemplando o estado da rede, carimbo de tempo e requisitos elétricos que criem oportunidades para massificação dos recursos energéticos distribuídos (REDs). A plataforma tem sua proposta de valor definida para atuar em aspectos presentes nos sistemas elétricos atuais como as perdas significativas no transporte de energia, opções limitadas de escolha do consumidor em relação a seu provedor de energia e recursos energéticos operando de forma centralizada, para isso, traz o conceito de *Transactive Energy* (LO3 ENERGY, 2017), entendido como uma coleção de:

- Técnicas econômicas e de controle de fluxo de energia;
- Instrumentos para aprimorar a eficiência e segurança dos sistemas de energia;
- Infraestruturas intrinsecamente distribuídas, de acordo com a estrutura hierárquica tradicional da rede;
- Redes de comunicação pervasivas, com interação contínua dos participantes em todos os níveis de geração, para maior qualidade e resiliência do sistema.

A Exergy utiliza uma *Distributed Ledger Technology* (DLT) e *hardwares* conectados na rede elétrica para a conectividade, *tokens* como instrumento monetário e uma plataforma própria para criar serviços de valor agregado no mercado de energia, em uma composição para potenciais aplicações como a comercialização de energia P2P e a recarga inteligente de veículos elétricos.

2.6.3 Powerledger

A empresa Powerledger ¹⁰ com sede na Austrália atua em mercados descentralizados baseados em Blockchain, abrange 11 países, incentivando a criação de mercados que empreguem predominantemente fontes renováveis, e a democratização do comércio de energia com sistemas mais transparentes que permitam consumidores e comunidades a independência na escolha da fonte da energia consumida (POWERLEDGER, 2019). Sua plataforma é baseada na rede Ethereum e opera em duas camadas por meio de seus *tokens Power Ledger Token* (POWR), atuando na primeira camada da Ethereum, é utilizada como um contrato de garantia de energia por meio do vínculo de POWR e o *token Sparkz*, utilizado para efetivar as transações de energia e moeda local. O preço do Sparkz não é fixo, podendo ser gerado e destruído de acordo com a demanda, e representa um lastro entre o custo de energia e a moeda local, existindo diferentes redes para cada moeda local, para permitir que diferentes moedas fiduciárias participem do ecossistema Power Ledger em preços distintos (COINCENTRAL, 2018).

A plataforma é estruturada em componentes chamados xGrid para compra e venda P2P, uGrid para comercialização em empreendimentos com múltiplos consumidores como é caso de condomínios e prédios residenciais, C6+ para rastreamento e créditos de carbono e o *Asset Germination* para monetização dos excedentes de energia nas comunidades energéticas (POWERLEDGER, 2019).

¹⁰ Site oficial pode ser acessado em <https://www.powerledger.io/>

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo, todas as etapas realizadas durante o trabalho e tecnologias utilizadas no desenvolvimento da arquitetura e dos experimentos realizados são descritas.

3.1 Materiais

Para a realização deste trabalho foram utilizadas cinco redes Blockchain públicas e compatíveis com a EVM, listadas a seguir:

- A escolha dessa rede como base para a *tokenização* da energia elétrica se dá pela capacidade de executar contratos inteligentes e da grande participação da comunidade na manutenção da rede e sua compatibilidade com bibliotecas Javascript, que serão utilizadas para o desenvolvimento da aplicação que se comunicará com a rede Blockchain;
- A rede Ethereum Classic¹¹ é uma Blockchain pública P2P, baseada em *Proof-of-Work*, e derivada da rede Ethereum. Tal derivação se sucedeu após um ataque hacker ocorrido em 17 de junho de 2016, a uma vulnerabilidade de um contrato inteligente na rede Ethereum que ocasionou em um acúmulo de cerca de 3.6 milhões de Ethers pelo atacante, cerca de 150 milhões de dólares na data do ataque. Descontentes, os desenvolvedores e engenheiros da Ethereum decidiram por um *hard fork* na rede, ou seja, uma bifurcação da Blockchain a partir de um determinado bloco, que no caso haveria de ser no bloco anterior ao ataque hacker. Diante do ocorrido, a comunidade em partes entendeu que as ações tomadas não eram compatíveis com o conceito de imutabilidade que sustenta as criptomoedas, e optaram por continuar a rede em sua cronologia original, que passou a se chamar Ethereum Classic, mantida pela comunidade *open-source*;
- Outra rede utilizada é a Binance Smart Chain¹² que é conectada a um sistema com 21 nós validadores, em um algoritmo de consenso conhecido como *Proof of Staked Authority* (PoSA), que permite tempos curtos de bloco

¹¹ Site oficial da Ethereum Classic pode ser acessado pelo link <https://ethereumclassic.org/>

¹² Site oficial da rede Binance Smart Chain <https://www.bnbchain.world/en/smartChain>

e taxas baixas. A rede é compatível com a EVM e seu *token* nativo é a BNB, utilizada para o gas de contratos inteligentes e para a participação (*stake*) como validador da rede;

- A Polygon ¹³ é uma Blockchain de solução de escalabilidade para Blockchains públicas, conhecida como Blockchain de segunda camada da rede Ethereum, sua arquitetura é baseada em *Proof-of-Stake* e possui capacidades de transacionar recursos de uma Blockchain para outra. A rede permite desenvolvedores utilizarem o *token* nativo MATIC para construção de produtos escaláveis por meio de contratos inteligentes compatíveis com a EVM, com capacidade de processamento de 65000 transações/segundo e custo aproximadamente dez mil vezes menor que a rede Ethereum. A Polygon possui a EIP-1559 implementada em seu sistema de taxaço por unidade de gas;
- Por fim, a rede Blockchain Avalanche é uma plataforma *open-source* para aplicações descentralizadas e Blockchains corporativas em um ecossistema interoperável de alta escala. É a primeira plataforma descentralizada de *smart contracts* feita para escala de finanças globais. Avax é o *token* nativo da rede, utilizado para pagar pelas taxas e assegurar a plataforma por meio do *stake*. Avalanche possui a implementação da EIP-1559 em seu mecanismo de taxaço e queima de *tokens*.

Para coletar dados relacionados as taxas de gas em cada rede, e o preço em dólar do *token* nativo, foram utilizadas interfaces de programação de aplicações (API) para auxiliar nesta tarefa, sendo elas:

- Bitquery, que é um conjunto de produtos de software que analisam, indexam e armazenam dados de Blockchain de uma forma unificada, sua aplicação web é projetada para prover uma interface de API *GraphQL* para acessar dados de mais de 30 redes Blockchains, incluindo todas as redes utilizadas neste trabalho;
- O Etherscan é um explorador de blocos com suporte a interface de programação de aplicações (API) e inteligência analítica, é a principal plataforma web para buscar dados na Blockchain da Ethereum, e será utilizado para a conferência de dados relacionados as taxas de transação

¹³ Site oficial da rede Polygon <https://polygon.technology/solutions/polygon-pos/>

da rede Ethereum e análise das transações efetuadas na rede. Além do buscador da rede Ethereum, o Etherscan possui outros produtos de mesma finalidade para redes Blockchain diferentes, como o BscScan, utilizado para buscar dados da rede BNB Chain, e a Polygonscan utilizada para buscar dados na rede Polygon Chain, estes buscadores serão utilizados como base de dados para este trabalho;

- Por fim, a CoinAPI é uma plataforma que unifica dados do mercado de criptomoedas em uma única API. Seu banco de dados possui mais de 20 *Terabytes* de dados históricos de mercado incluindo as maiores corretoras de criptomoedas. Uma chave de API gratuita permite até cem requisições por dia, que ao decorrer do projeto será suficiente para a coleta de dados dos preços em dólar das criptomoedas selecionadas para este trabalho.

Para a etapa de desenvolvimento do contrato inteligente, utilizou-se a linguagem orientada a objetos Solidity¹⁴, não ambígua e de alto nível desenvolvida em 2014 por Gavin Wood e atualmente mantida pela comunidade *open-source*. Influenciado pelas linguagens C++, Javascript e Python possui uma sintaxe de programação baseado em colchetes para definir blocos de instrução, foi criado para compilar o código que será interpretado pelas EVMs, ou seja, Solidity é a linguagem oficial para desenvolver aplicações na Blockchain Ethereum.

O contrato inteligente foi codificado no ambiente de desenvolvimento integrado (IDE) conhecido como Remix IDE, uma aplicação web e desktop de código aberto, é uma ferramenta que ajuda na submissão dos contratos na rede por conta de seus módulos de teste e submissão de contratos inteligentes, neste trabalho é utilizada não só como interface para o desenvolvimento do código, mas para facilitar os testes do contrato inteligente e sua submissão através da biblioteca Web3.js, que realiza solicitações para gerenciadores de contas como é o caso do Metamask.

O Web3.js¹⁵ permite a interação com a Blockchain por meio de interfaces web, compõem uma coleção de bibliotecas que permite execuções de leitura e gravação de contratos inteligentes, envio de *tokens* de uma conta para outra, dentre outras ações relacionadas a rede Ethereum, e as redes compatíveis com a EVM.

¹⁴ A documentação da linguagem pode ser acessada pelo link <https://soliditylang.org/>

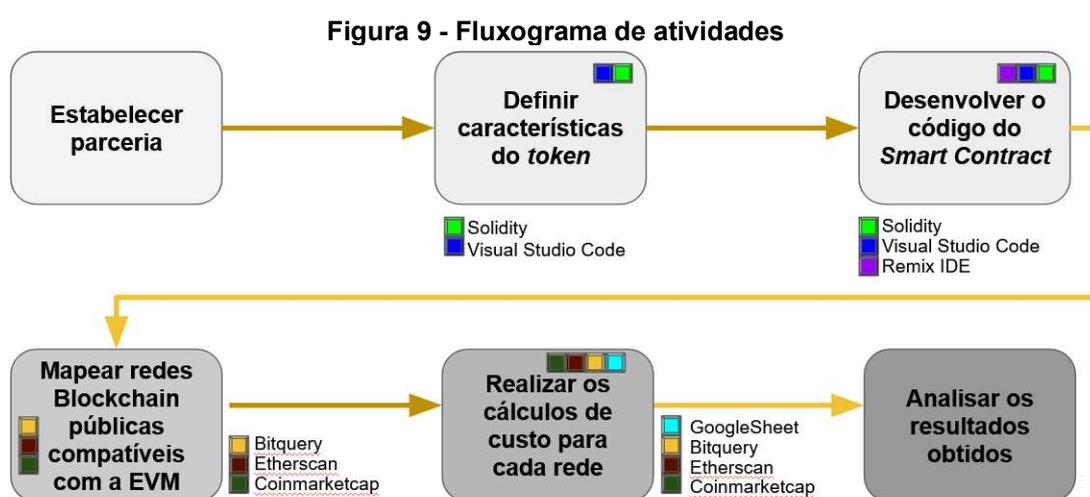
¹⁵ Documentação oficial do Web3.JS pode ser acessado em <https://web3js.readthedocs.io/en/v1.5.2/>

Para Maccubbin (2022) o Web3.js utiliza codificações em JSON (*Javascript Object Notation*) para fazer chamadas de procedimento remoto pelo protocolo JSON RPC (*Remote Procedure Call*) a um nó conectado na rede para interagir com a Blockchain do Ethereum.

Já o Metamask¹⁶ foi criado para atender as necessidades de segurança e usabilidade envolvendo aplicações web baseadas em qualquer rede compatível com a JSON RPC da Ethereum, incluindo redes Blockchain privadas e customizadas. Permite aos usuários gerenciarem suas contas e chaves e interagir com contratos inteligentes. Funciona como uma extensão dos principais navegadores disponíveis como o Chrome e Firefox e como aplicativo móvel, tendo como foco a privacidade, mantendo toda a informação de senhas e chaves no dispositivo onde foi instalado. O Metamask injeta a Ethereum web3 API dentro de qualquer website baseado em Javascript, como é o caso do Remix IDE, e por isso se mostra uma boa escolha como gateway entre a IDE para a submissão do contrato inteligente na Blockchain da Ethereum.

3.2 Métodos

Foram divididas em atividades as etapas que serão executadas para se verificar o fenômeno em questão. A Figura 9 exemplifica como será o fluxo dessas atividades.



Fonte: Autoria própria (2022)

¹⁶ Site oficial do Metamask pode ser acessado pelo link <https://metamask.io/>

Inicialmente, foi estabelecida uma parceria com uma Instituição de Ciência e Tecnologia (ICT) em formato de associação, dedicada ao desenvolvimento do biogás e da promoção do mercado de energias renováveis, incluindo análise do ambiente regulatório e tomada de decisão, e que colaborou com a definição das características do *token* e criação de outros aspectos que pudessem viabilizar a representação do excedente de energia elétrica e as regras vigentes do sistema de compensação de energia elétrica.

Algumas características intrínsecas do *token* foram definidas no construtor do contrato como o limite de duas casas decimais e suprimento máximo de dez mil unidades, como demonstra o Quadro 2, contendo todos os atributos do *token*.

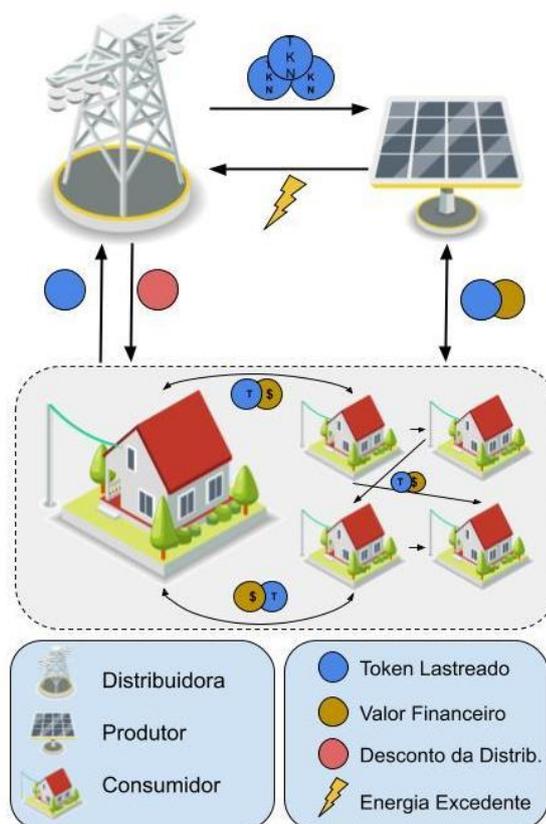
Quadro 2 - Atributos do *token* gerado

Atributo	Valor
Nome	Energy Token
Suprimento total	10000,00
Decimais	2
Símbolo	CIB
Versão	1.0

Fonte: Autoria própria (2022)

Na etapa de desenvolvimento, foi aplicada as definições estabelecidas para as características do *token* e desenvolvido o *smart contract* à partir do padrão ERC-20, permitindo que as transações de *tokens* ocorram de modo P2P, partindo da hipótese de uma distribuidora que permita a transferência de excedentes de energia entre produtores e consumidores dentro da sua área de atuação, podendo possibilitar a um produtor interessado a injetar seu excedente de energia à distribuidora em troca de uma quantidade de *tokens* equivalentes, possibilitando que haja transferência desse *token* entre partes interessadas (como um consumidor que queira negociar esta titularidade em troca de algum valor financeiro). Assim, a distribuidora não exercerá qualquer controle sobre essas negociações, e ficará apenas na responsabilidade de converter o *token* para um desconto na fatura de energia, como ilustra o modelo da Figura 10.

Figura 10 - Fluxo de transação de valor entre atores



Fonte: Autoria própria (2022)

Após a conclusão do desenvolvimento do contrato inteligente, sua submissão na rede de testes (*testnet*) da Ethereum e a realização de uma transferência de *tokens* revelará os valores de gás utilizados como base para os cálculos realizados. O uso da *testnet* para este tipo de atividade incorre sobre as mesmas taxas da rede principal, porém não possuem valor financeiro associado. Desse modo é possível calcular o custo de escrita e atualização de dados na rede em um determinado momento utilizando a Equação 6:

$$Custo = Gp \cdot Gc \quad (6)$$

Em que, Gp é um valor que representa o preço do gás para a transação e assumirá os valores coletados na submissão do contrato inteligente, e na transferência do *token* no ambiente de testes, para cálculos separados. E Gc representará a quantidade paga por unidade de gás consumida para a efetivação da ação, este valor é variável e depende da demanda da rede.

Com estes dados a próxima etapa é o mapeamento das redes compatíveis com a EVM, onde foi selecionada cinco redes compatíveis, por ordem de liquidez de

mercado, sendo as redes: Ethereum (ETH), Ethereum Classic (ETC), Binance Smart Chain (BNB), Polygon (MATIC) e Avalanche (AVAX). Para determinar a ordem de liquidez, utilizou-se a plataforma Coinmarketcap na data de fevereiro de 2022. Este critério permite que as redes selecionadas sejam as de menor oscilação de preço de mercado, trazendo conseqüentemente uma maior estabilidade financeira em relação aos custos de execução do contrato inteligente.

Foi utilizado a API da Bitquery para coletar dados de três meses, compreendido entre primeiro de fevereiro a trinta de abril de 2022 para a coleta do preço médio mensal em *gwei* por unidade de gás nas cinco redes selecionadas.

Para transpor os valores obtidos em *gwei* para valores em moeda fiduciária, utilizou-se a API da CoinAPI durante o período de coleta de dados, para coletar os preços diários e determinar o preço médio mensal em dólares americanos (USD) das criptomoedas utilizadas.

Todos os dados foram transferidos para uma planilha do Google Sheets onde os dados foram associados e processados em gráficos para facilitar a análise.

Por fim, a análise dos dados obtidos através dos buscadores de blocos e ferramentas de inteligência analítica contribuem para a formulação de hipóteses para a definição dos impactos do uso de redes Blockchain pública para *tokenização* de energia elétrica e qual seria o impacto no custo em uma aplicação comercial da rede.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo será tratado as características desenvolvidas no contrato inteligente e dos resultados obtidos na captação dos dados e dos cálculos realizados.

Utilizando o Remix IDE foi realizada a submissão do contrato inteligente na *testnet* da Ethereum e obtido o valor de 963.545 unidades de gas para a execução da transação, como indica o *log* no campo *transaction cost* da Figura 11.

Figura 11 - log de submissão do contrato inteligente no Remix IDE

```

status      true Transaction mined and execution succeed
transaction hash  0xd1b6b9a34b84acd97ddaa0f317a5b3c2255ed771f627256515dc7d23ddccfeb2
from        0xBedb64fB273dEd7fcA31E9BAAd8FC94e5ab52F6E2
to          Cibogas.(constructor)
gas         963545 gas
transaction cost 963545 gas

```

Fonte: Autoria própria (2022)

Já ao utilizar o Metamask para realizar uma transação de transferência de dez unidades do *token* entre dois endereços distintos obteve-se um consumo de 34.636 unidades de gas. Vale ressaltar que as dez unidades de *tokens* foram escolhidas arbitrariamente, e este valor não depende da quantidade de *tokens* transacionadas e sim do custo para se construir e executar a transação na EVM.

Com o auxílio do Etherscan, ao inserir o *hash* da transação no buscador, é possível constatar o consumo em gas da transação, como indica o trecho do resultado da busca na Figura 12.

Figura 12 - Resultado do Etherscan ao consultar o hash da transação executada

② Tokens Transferred:	From 0xbedb64fb273de... To 0xba9d8daa9c286... For 10 Cibogas (CIB)
② Value:	0 Ether (\$0.00)
② Transaction Fee:	0.000051954000484904 Ether (\$0.00)
② Gas Price:	0.000000001500000014 Ether (1.500000014 Gwei)
② Gas Limit & Usage by Txn:	51,954 34,636 (66.67%)
② Gas Fees:	Base: 0.000000014 Gwei Max: 1.500000019 Gwei Max Priority: 1.5 Gwei
② Burnt & Txn Savings Fees:	Burnt: 0.00000000000484904 Ether (\$0.00) Txn Savings: 0.0000000000017318 Ether (\$0.00)

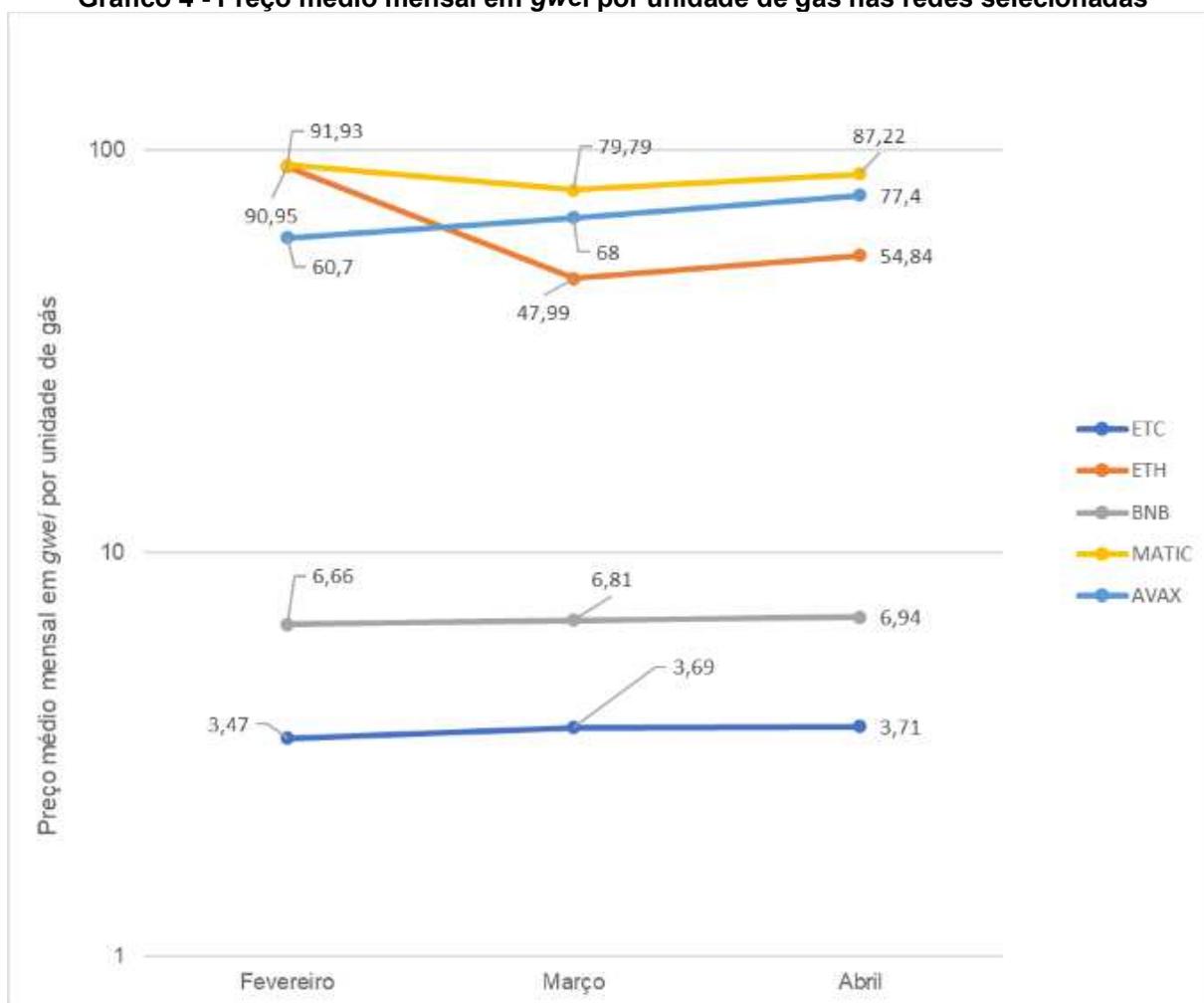
Fonte: Autoria própria (2022)

Observando a linha “*Gas Limit & Usage by Txn*” o buscador indica o consumo de 34.636 unidades de gas para um total de 51.954 unidades máximas setadas como limite pelo Metamask ao realizar a transação.

Tem-se os custos relacionados ao contrato inteligente desenvolvido, que serão utilizados como parâmetros nos cálculos subsequentes sendo a submissão de contrato inteligente na rede igual a 963.545 unidades de gas, e a transferência de *tokens* entre endereços 34.636 unidades de gas.

O custo em *gwei* por unidade de gas nas redes selecionadas foram dispostos em médias mensais que foram utilizadas para o cálculo de conversão do custo total em *gwei* para dólar americano. Estes valores estão disponíveis no Gráfico 4.

Gráfico 4 - Preço médio mensal em *gwei* por unidade de gas nas redes selecionadas

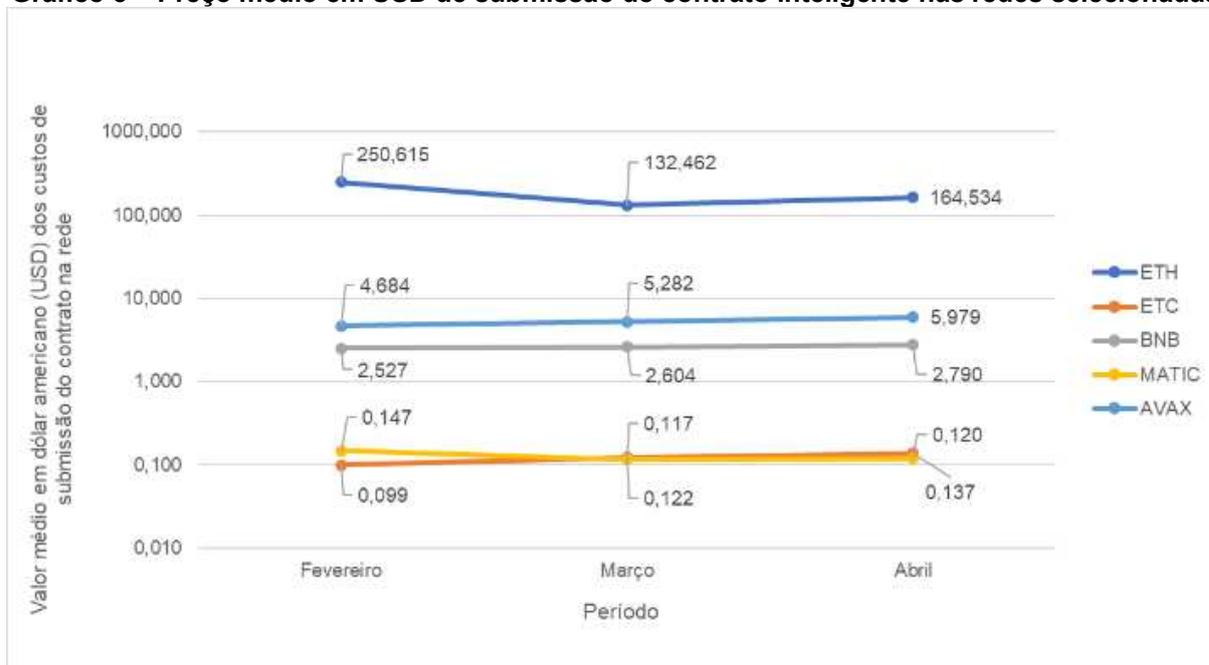


Fonte: Autoria própria (2022)

Utilizando o cálculo de custo de transação para cada rede, obteve-se o custo total em *gwei*, tendo como parâmetros o custo médio mensal em unidades de gas para uma determinada ação, e o preço médio mensal por unidade de gas. Para os valores

relacionados à submissão do contrato inteligente na rede, obteve-se os valores do Gráfico 5, tendo o custo médio de transação mais caro ocorrida na rede ETH, e a mais barata na rede ETC, ambas na data de fevereiro de 2022.

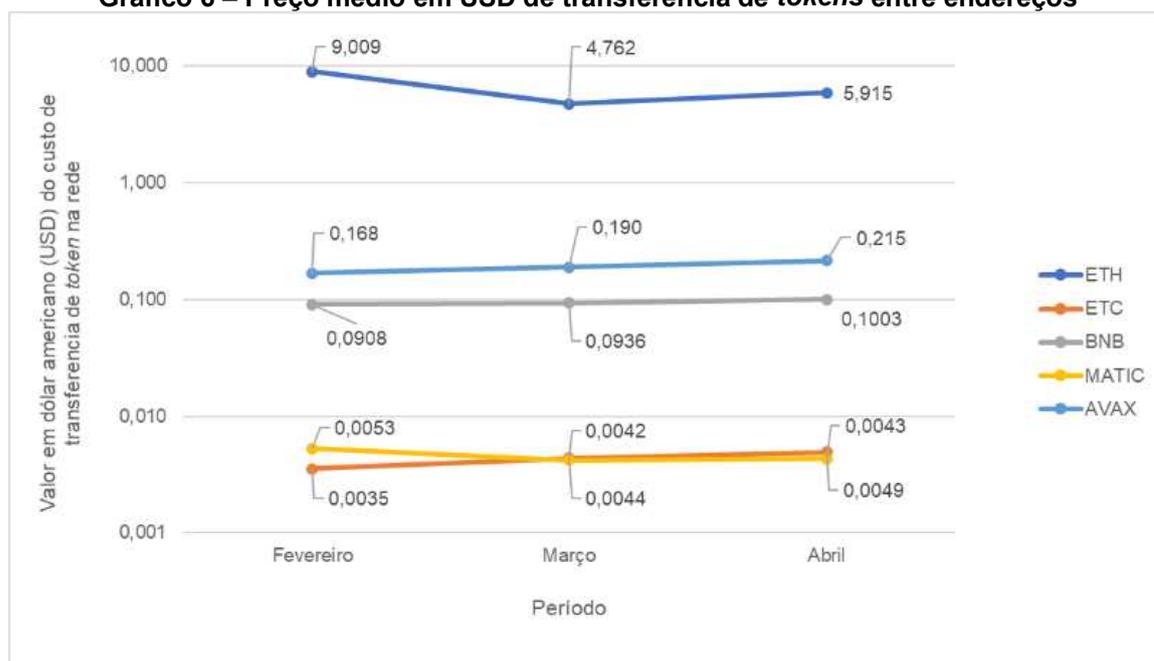
Gráfico 5 – Preço médio em USD de submissão do contrato inteligente nas redes selecionadas



Fonte: Autoria própria (2022)

Os valores em dólares para uma transferência de *tokens* entre endereços pode ser visto no Gráfico 6, mantendo a rede ETH com a maior diferença de preços.

Gráfico 6 – Preço médio em USD de transferência de *tokens* entre endereços



Fonte: Autoria própria (2022)

É notável a disparidade de custo entre a rede Ethereum com relação as demais, promovido não somente pela grande diferença de preço em dólar do Ether mas também por problemas de composição da rede, como largura de banda e tamanho limitado dos blocos, somado ao crescimento da demanda da rede, causando uma maior competição por espaço nos blocos, conseqüentemente elevando as taxas de transação.

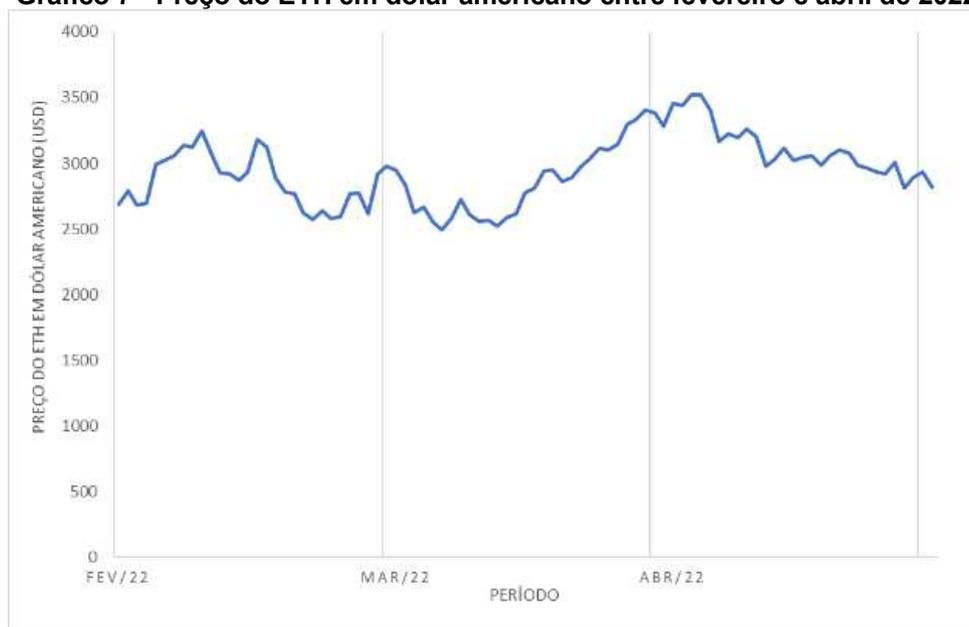
Ainda que a implementação da EIP-1559 tenha resultado em maior previsibilidade no preço das taxas, algoritmos de validação baseados em PoW tendem a elevar os custos de transação, uma vez que o dispêndio energético dos mineradores para executar o algoritmo deve de alguma forma ser compensado pelos usuários da rede.

Estas lacunas promovem o surgimento de redes derivadas da Ethereum, como a Avalanche e Polygon, pensadas desde sua concepção na resolução de problemas de escalabilidade, velocidade e custo já conhecidos pelo seu precursor.

4.1 Rede Ethereum

No período estudado o preço em dólar americano do Ether teve seu valor máximo de US\$ 3.521,64 em 06 de abril, e o valor mínimo de US\$ 2.492,42 em 09 de março, com desvio padrão de US\$ 255,55 em relação à média de US\$2.947,17 e uma amplitude de variação de US\$ 1.029,26 como pode ser percebido no Gráfico 7.

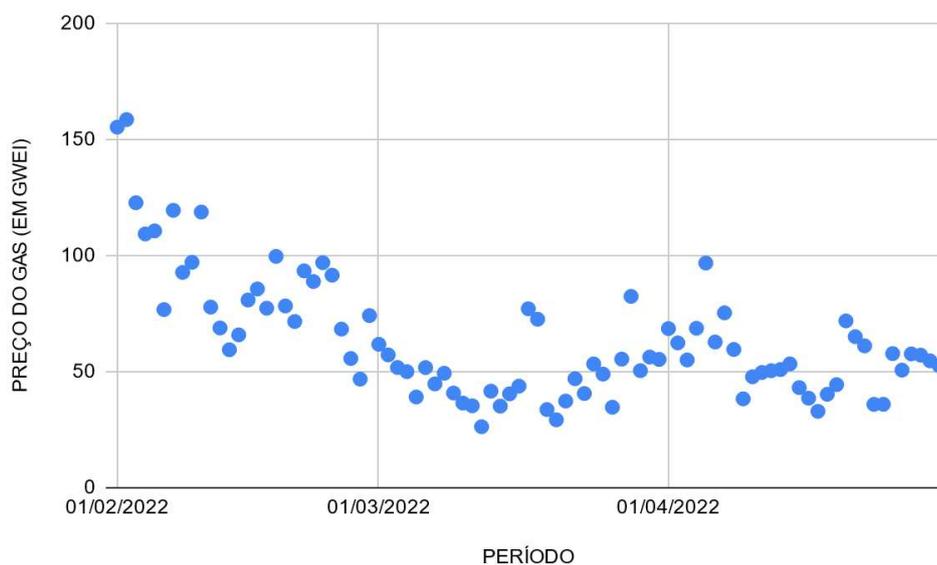
Gráfico 7 - Preço do ETH em dólar americano entre fevereiro e abril de 2022



Fonte: Autoria própria (2022)

Já o preço médio diário em *gwei* no período mostrou um decrescimento ainda que possua alguns pontos discrepantes, como é possível observar por meio da dispersão no Gráfico 8.

Gráfico 8 – Dispersão de preço médio diário de gas em *gwei* na rede ETH durante 90 dias



Fonte: Autoria própria (2022)

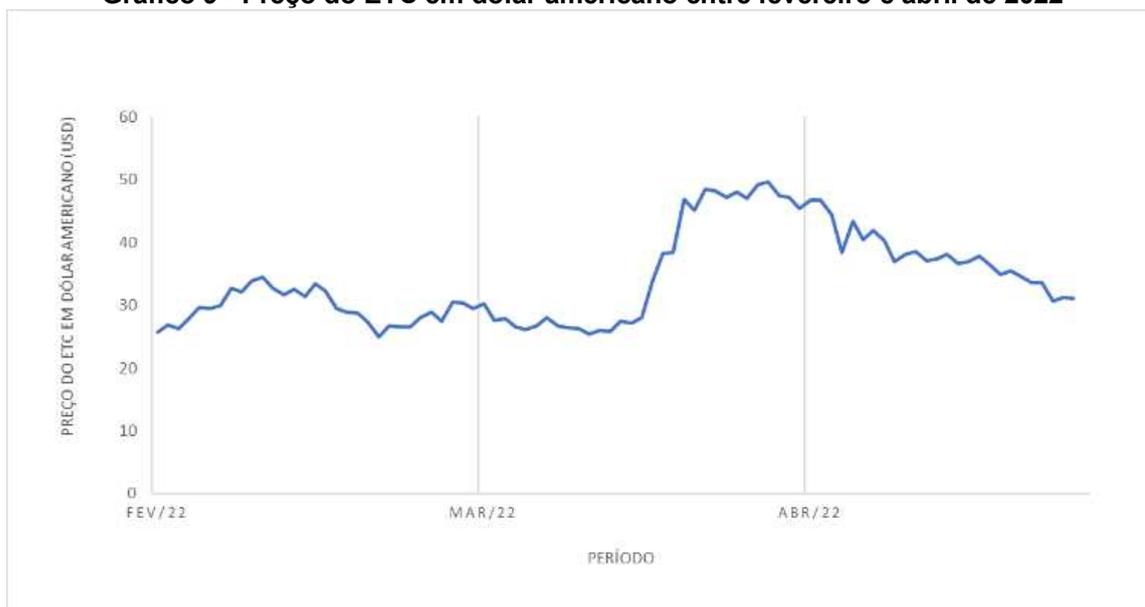
De modo geral, a rede Ethereum não demonstra atratividade para a implementação do *token*, possuindo o maior custo por transação entre as redes selecionadas.

4.2 Rede Ethereum Classic

O preço do ETC atingiu a máxima de US\$ 49,61 em 31 de março e a mínima de US\$ 24,98 em 22 de fevereiro, seu preço médio foi de US\$ 34,16 e desvio padrão de US\$ 7,32 representando uma grande variação de preço no decorrer do período.

O Gráfico 9 exhibe as oscilações de preço do ETC em dólares americanos no período de 90 dias.

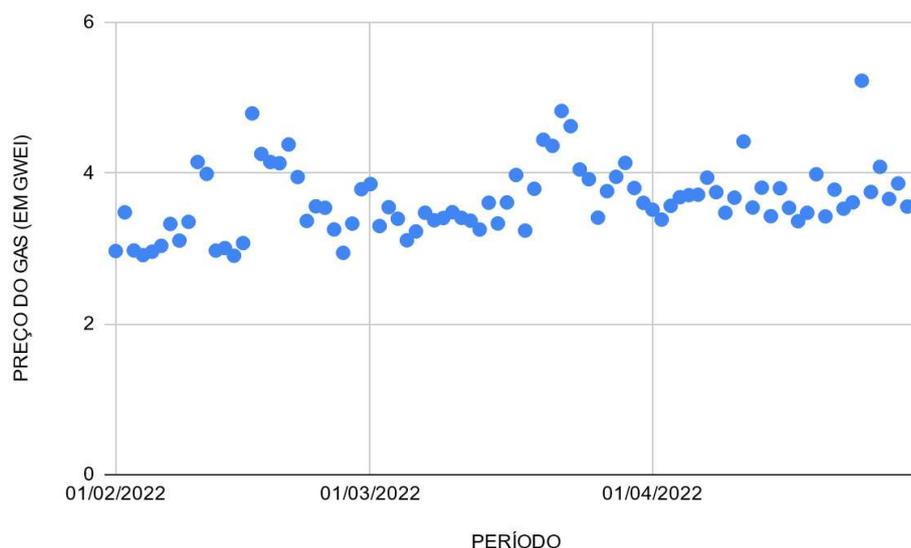
Gráfico 9 - Preço do ETC em dólar americano entre fevereiro e abril de 2022



Fonte: Autoria própria (2022)

A rede Ethereum Classic adquire vantagem em relação as demais redes por dispor o menor valor médio em *gwei* por unidade de gas durante o período de estudo, evidenciado no Gráfico 10.

Gráfico 10 – Dispersão de preço médio diário de gas em *gwei* na rede ETC durante 90 dias



Fonte: Autoria própria (2022)

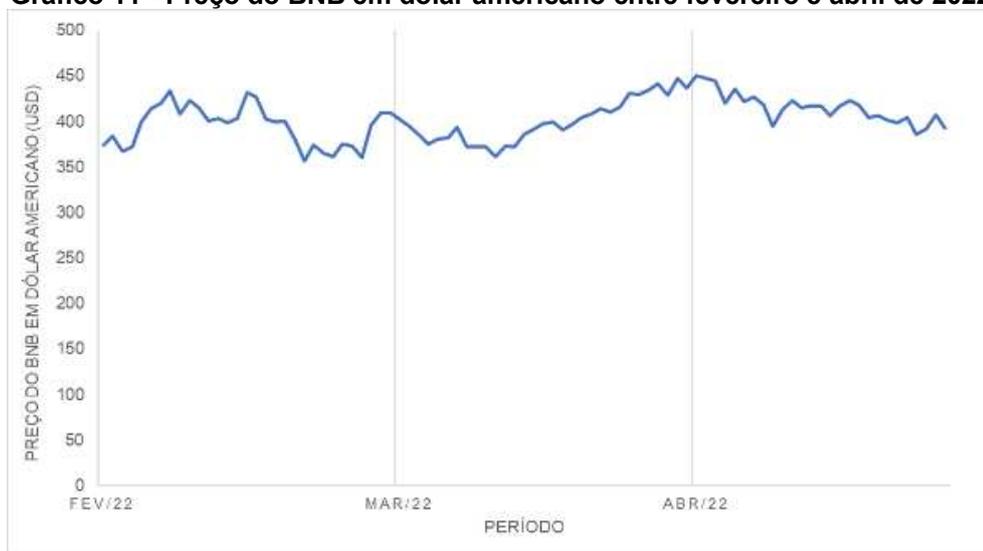
É possível perceber uma certa atratividade para a *tokenização* de ativos devido ao baixo custo de transação na rede ETC, no entanto, a alta oscilação do preço em dólar pode provocar riscos no planejamento de custos para operações com finalidades comerciais. Outro possível risco encontrado em redes mantidas pela

comunidade *open-source* como é o caso do ETC é a falta de consenso quanto a forma de manutenibilidade da rede, e seus objetos de interesse.

4.3 Rede Binance Smart Chain

A Binance Smart Chain foi a rede que demonstrou maior estabilidade de preços, com valor mínimo de US\$ 356,79 em 22 de fevereiro e tendo seu valor máximo de US\$ 450,38 atingido em 4 de abril, tendo o menor desvio padrão entre as redes selecionadas, de US\$22,75 em relação a média de preço de US\$ 402,79 no período. O preço em dólar no período de estudo é observado no Gráfico 11.

Gráfico 11 - Preço do BNB em dólar americano entre fevereiro e abril de 2022



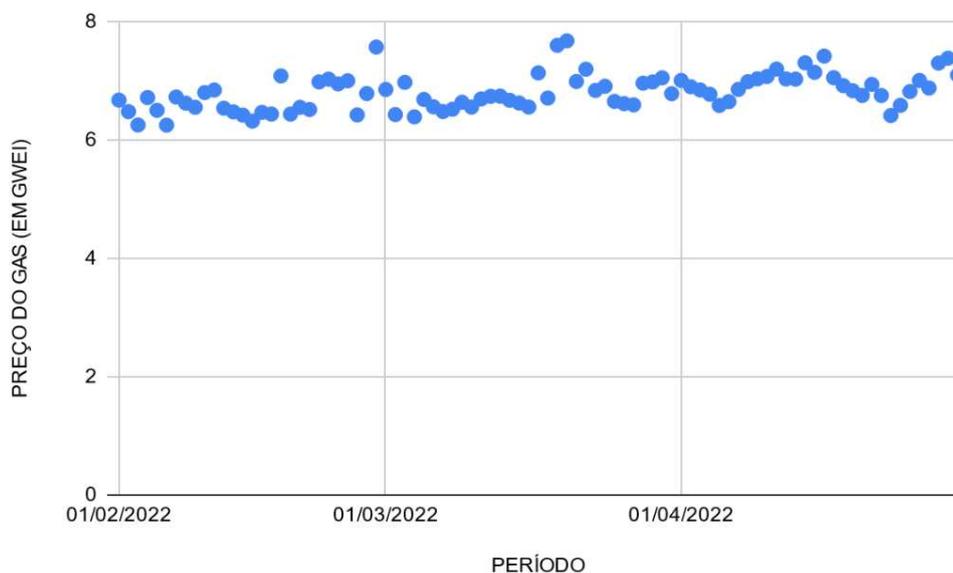
Fonte: Autoria própria (2022)

Também é possível constatar uma baixa dispersão em relação aos preços por unidade de gas em *gwei*, esta homogeneidade pode se refletir em uma maior assertividade ao se planejar custos com base nessa rede.

A rede possui mecanismos próprios para cálculo de taxas e controle de inflação do BNB, portanto não é compatível com a EIP-1559, ainda assim demonstra boa previsibilidade no custo da unidade de gas.

O Gráfico 12 exibe a dispersão do preço por unidade de gas no período.

Gráfico 12 - Dispersão de preço médio diário de gas em gwei na BSC durante 90 dias



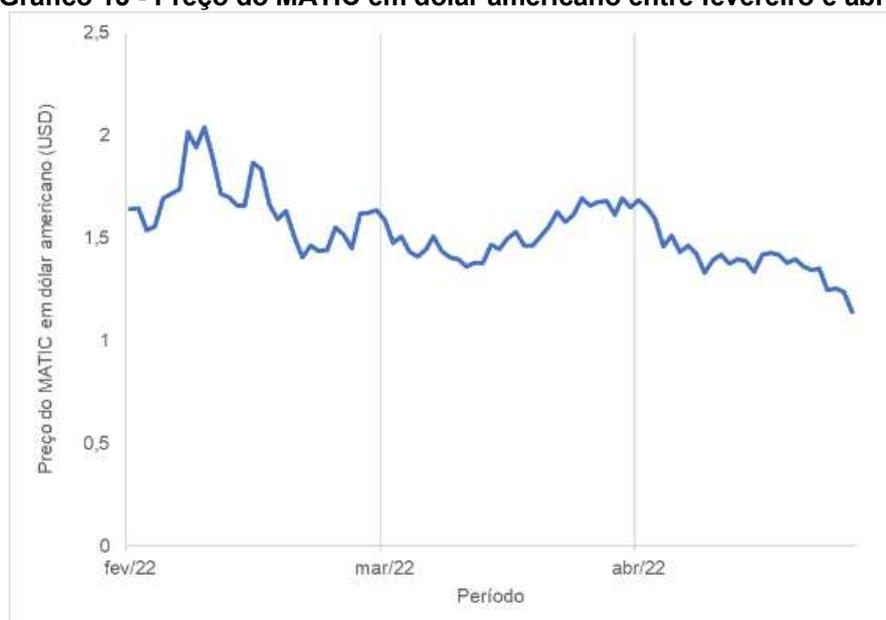
Fonte: Aatoria própria (2022)

A rede demonstra grande potencial para *tokenização* de ativos devido a sua estabilidade econômica, além de possuir um ecossistema com corretoras descentralizadas que dão suporte a troca de *tokens* na rede.

4.4 Rede Polygon

A Polygon é a rede que possui seu *token* nativo (MATIC) com o menor custo em dólar entre as redes selecionadas, tendo o pico de US\$ 2,03 em 10 de fevereiro, seguindo uma tendência de queda até o encerramento do período de estudo, valorado em US\$ 1,14 em 30 de abril. A média do período foi de US\$ 1,53 com o desvio padrão de US\$ 0,16 que pode ser equiparado ao desvio das demais redes selecionadas, de cerca de 10,94% de desvio em relação à média.

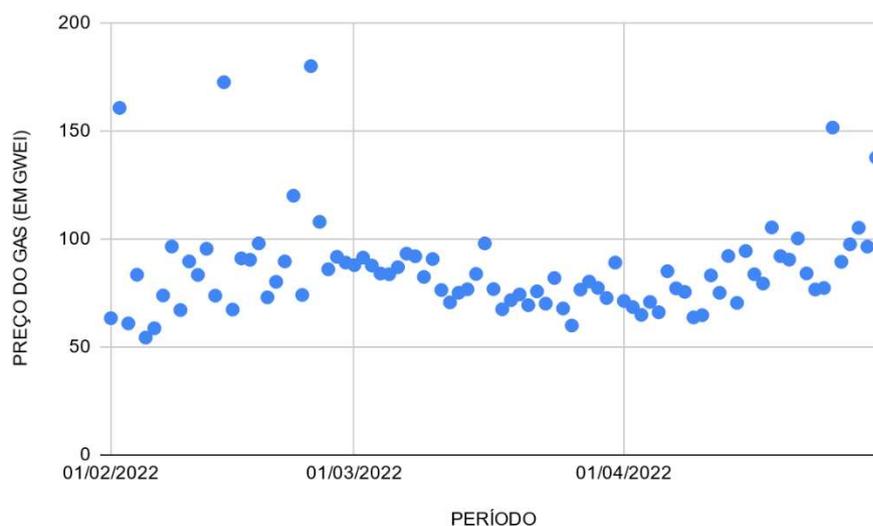
O Gráfico 13 exibe o preço em dólar no período de estudo, onde é possível constatar seu baixo custo e tendência de baixa.

Gráfico 13 - Preço do MATIC em dólar americano entre fevereiro e abril de 2022

Fonte: Autoria própria (2022)

A dispersão do preço médio diário em *gwei* concentra-se em sua maioria na faixa de 50 a 100 *gwei* por unidade de gás, apesar de alguns valores discrepantes, que em parte podem ser ocasionados pelo baixo custo em dólar do MATIC, fazendo com que os remetentes das transações aumentem a taxa em *gwei* de acordo com sua conveniência, sem expressar um grande impacto financeiro no custo da transação.

O Gráfico 14 ilustra a dispersão do preço do gas na rede Polygon, em *gwei* no período.

Gráfico 14 – Dispersão de preço médio diário de gas em *gwei* na rede Polygon durante 90 dias

Fonte: Autoria própria (2022)

Em relação ao preço do *token* nativo, o MATIC se destaca com o menor preço em dólar entre as redes selecionadas, e juntamente com o ETC possui as menores taxas de transação, no entanto, a rede Polygon é construída como uma solução para a o problema de escalabilidade encontrado no ETH, também contido no ETC.

A Polygon possui a implementação da EIP-1559 proporcionando uma melhor previsibilidade no preço mínimo em *gwei* por unidade de gas necessário para a inclusão da transação no bloco.

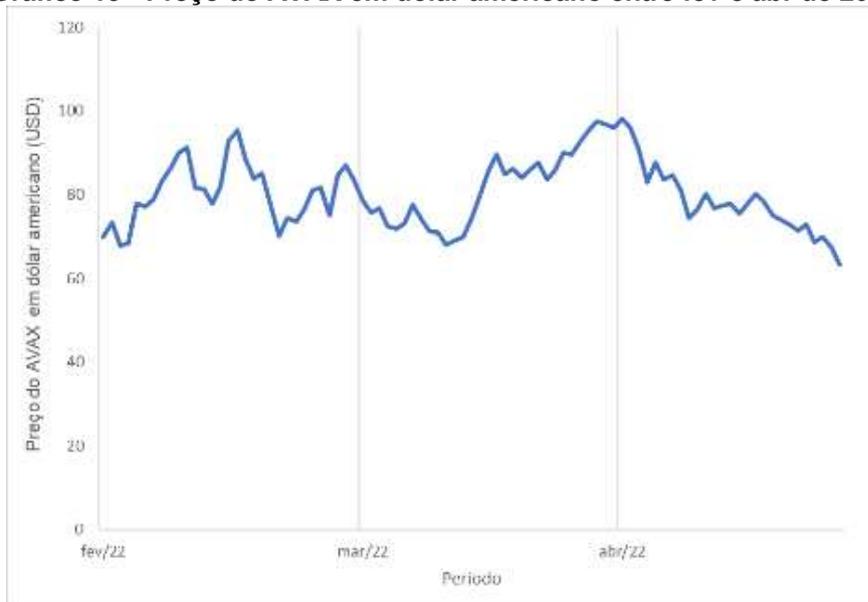
Considerando outros aspectos além do custo da rede, a Polygon se torna a melhor escolha para a *tokenização* do excedente de energia elétrica, pela sua capacidade de interoperabilidade com a rede Ethereum, algoritmo de consenso com baixo dispêndio energético, e confirmações entre blocos com tempo médio de 2 segundos.

4.5 Rede Avalanche

A rede Avalanche possui seu *token* nativo AVAX com precificação máxima de US\$ 98,03 e mínima de US\$ 63,38 com uma amplitude de variação de US\$ 34,65 e média de preço de US\$ 80,29 no período estudado.

O preço do AVAX é visto no Gráfico 15, que ilustra as oscilações no período.

Gráfico 15 - Preço do AVAX em dólar americano entre fev e abr de 2022

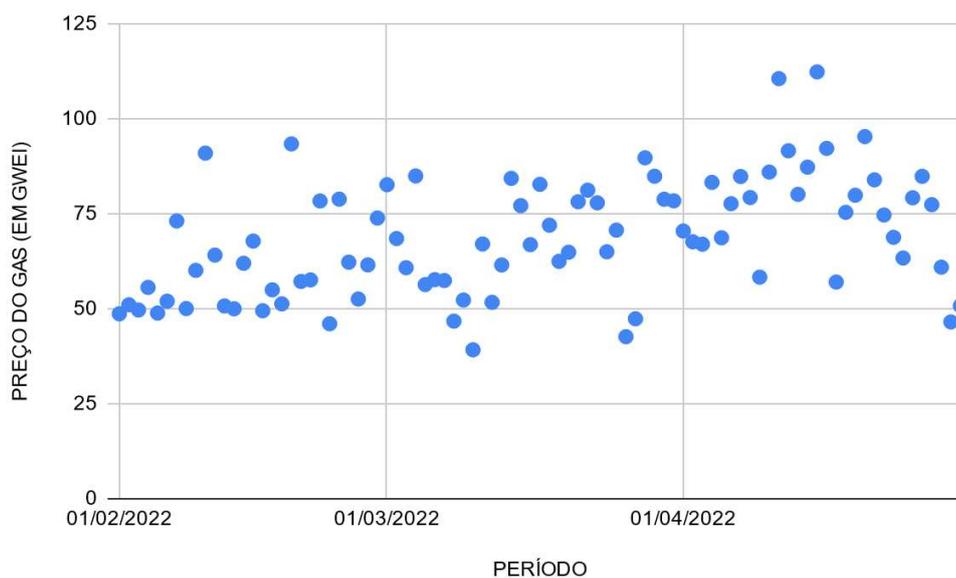


Fonte: Autoria própria (2022)

O preço médio diário de gas em *gwei* sofre grandes oscilações ao longo do período de estudo, mas pode ser compreendido por uma faixa entre 50 e 100 *gwei*, no entanto, diferentemente da rede Polygon, o preço mais elevado da AVAX faz com que o impacto da dispersão do preço em *gwei* seja maior ao convertê-lo para dólar.

O Gráfico 16 mostra a dispersão de preço médio diário de gas para a rede Avalanche.

Gráfico 16 - Dispersão de preço médio diário de gas em *gwei* na rede Avalanche durante 90 dias



Fonte: Autoria própria (2022)

Apesar do custo do gas em *gwei* na rede Avalanche se assemelhar ao da rede Polygon, estando contidos em sua maioria na faixa entre 50 e 100 *gwei*, a diferença de preço em dólar do AVAX em relação ao MATIC é de mais de 30 vezes, criando impactos no custo final na mesma proporção, fazendo com que a alta dispersão contida nos custos médios diários de *gas* para as transações impliquem em dificuldades ao realizar um planejamento financeiro baseando-se na AVAX.

Vale considerar que o custo é um fator de grande importância para o planejamento de um produto *tokenizado* para o setor energético, mas também é possível analisar outras características intrínsecas de uma determinada rede Blockchain, como o custo energético para a validação dos blocos e seu apelo mercadológico para o setor elétrico.

5 CONCLUSÃO

Foi possível constatar a inviabilidade da rede Ethereum, contendo os maiores custos de submissão do contrato e transferência de *tokens* entre as redes estudadas.

A rede Binance Smart Chain teve o preço de seu *token* nativo com a maior estabilidade financeira no período estudado, contribuindo para a estabilidade de preços para a execução de código na rede.

O menor custo entre as redes é a da Ethereum Classic, tanto para submissão do contrato na rede quanto para a transferência de *tokens* entre endereços na rede, seguido da rede Polygon com preços ligeiramente mais altos, mas que é a mais viável para a submissão de ativos digitais como a *tokenização* do excedente de energia, devido ao baixo custo de seu *token* nativo MATIC e de implementações que implicam em maior previsibilidade nas taxas da rede como é o caso da EIP-1559.

5.1 Trabalhos Futuros

Como sugestão de trabalhos futuros é possível executar uma série de comparações entre as redes, que não entraram no escopo deste trabalho, como comparações de performance, dispêndio energético e segurança da informação.

Outra possibilidade é a comparação de custos entre o uso de redes Blockchain públicas, onde o custo incorre sobre o uso da rede, e de redes Blockchain permissionadas onde o custo incorre sobre a infraestrutura necessária para a construção e manutenção da rede.

REFERÊNCIAS

- AID. **Matriz energética cresce 383,66 MW em março e 682,61 MW no primeiro trimestre de 2021**. 2021. Disponível em: <https://bit.ly/3utCA8Q>. Acesso em: 06 ago. 2021.
- ALLIDINA, S.; **The Future of Blockchain in 8 Charts**. 2016. Disponível em: <https://www.raconteur.net/business-innovation/the-future-of-blockchain-in-8-charts>. Acesso em: 27 jul. 2021.
- ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica). Informações gerenciais 2019. **Boletim de Informações Gerenciais**, [s. l.], 2019. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/documents/656877/14854008/Boletim+de+Informa%C3%A7%C3%B5es+Gerenciais+-+1%C2%BA+trimestre+de+2019/b860054f-79ec-6608-951a-fb2288701434>. Acesso em: 27 jun. 2021.
- _____. **Geração Distribuída**. 2018. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/geracao-distribuida>. Acesso em: 07 nov. 2021.
- ANTONPOULOS, A M.; **Mastering Bitcoin: unlocking digital crypto-currencies**. Sebastopol, USA: O'Reilly Media, 2010. 262 p.
- ANTONPOULOS, A. M.; WOOD, G.; **Mastering Ethereum: building smart contracts**. [S. l.: s. n.], 2019.
- ARNOLD, L.; *et al.* Blockchain and Initial Coin Offerings: Blockchain's Implications for Crowdfunding. **Business Transformation through Blockchain**, p. 233–272, 22 dez. 2018. Disponível em: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-98911-2_8. Acesso em: 25 nov 2021
- BAKKE, G. A. **The Grid: the fraying wires between Americans and our energy future**. [S. l.]: Open WorldCat, 2017. ISBN 1632865688.
- BELCHIOR, R.; CORREIA, M.; VASCONCELOS, A. JusticeChain: Using Blockchain to Protect Justice Logs. **Lecture Notes in Computer Science**, v. 11877, n. 978-3-030-33246-4, p. 318–325, 2019. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-3-030-33246-4_21. Acesso em: 25 nov. 2021
- BMG. Brooklyn Microgrid Peer-to-Peer Energy Transaction. **Brooklyn Microgrid**. 29 jun. 2016. Disponível em: <https://www.brooklyn.energy/bmgtv>. Acesso em: 16 mar. 2022.
- BODKHE, U.; *et al.* Blockchain for Industry 4.0: A Comprehensive Review. **Institute of Electrical and Electronics Engineers**, v. 8, p. 79764–79800, 2020. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=9069885>. Acesso em: 27 jul. 2021.
- BORTOLETO, E. M. **A implantação de grandes hidrelétricas: desenvolvimento, discursos e impactos**. Geografias, [S. l.], n. 2, 2001. DOI: 10.7147/GEO2.1140.

Disponível em: <https://periodicos.ufes.br/geografares/article/view/1140>. Acesso em: 8 nov. 2021.

BRASIL. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Balanco Energético Nacional 2019: Ano Base 2018**. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-377/topico-494/BEN%202019%20Completo%20WEB.pdf>>. Acesso em: 10 nov. 2021.

BRASIL. **Lei n. 14.300, de 6 de janeiro de 2022**. Institui o marco legal da microgeração distribuída, o Sistema de Compensação de Energia Elétrica (SCEE) e o Programa de Energia Renovável Social (PERS). Brasília: Casa Civil, 2022. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2022/lei/L14300.htm. Acesso em: 27 abr. 2022.

BUTERIN, V.; *et al.* **Fee Market Change for ETH 1.0 Chain**: EIP-1559. 13 abr. 2019. Disponível em: <https://github.com/ethereum/EIPs/blob/master/EIPS/eip-1559.md>. Acesso em: 17 mai. 2022.

CARSON, B.; ROMANELLI, G.; WALSH, P.; ZHUMAEV, A. **Blockchain beyond the Hype: what is the Strategic Business Value**. Disponível em: <https://cybersolace.co.uk/CySol/wp-content/uploads/2018/06/McKinsey-paper-about-Blockchain-Myths.pdf>. Acesso em 27 jul. 2021.

CCEE (Câmara de Comercialização de Energia Elétrica). Evolução do Monitoramento. **Nota Técnica**. ago. 2021 Disponível em: [https://www.ccee.org.br/documents/80415/919440/20210825_CCEE_NT%203.1_Evolu%C3%A7%C3%A3o%20do%20Monitoramento%20v.%20final-Manifesto%20\(1\).pdf/41580926-268b-87cb-ee9c-08d3543e26e9](https://www.ccee.org.br/documents/80415/919440/20210825_CCEE_NT%203.1_Evolu%C3%A7%C3%A3o%20do%20Monitoramento%20v.%20final-Manifesto%20(1).pdf/41580926-268b-87cb-ee9c-08d3543e26e9). Acesso em 20 fev. 2022.

CRUZ, J. P.; KAJI, Y.; YANAI, N. RBAC-SC: Role-Based Access Control Using Smart Contract. **IEEE Access**, v. 6, p. 12240–12251, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2812844>. Acesso em: 25 nov. 2021

ENERGISA. **Setor Elétrico Brasileiro**. 29 jun. 2019. Disponível em: <https://api.mziq.com/mzfilemanager/v2/d/60f49a2d-bd8c-4fd9-95ab-bdf833097a83/b58ab099-92f9-52ea-4cf9-9c868e2575eb>. Acesso em: 31 mar. 2022.

EPE. **Recursos Energéticos Distribuídos**. 2019. Vol. 01. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-227/topico-457/GT%20PNE%20-%20RED%20-%20Relat%C3%B3rio%20Final.pdf>. Acesso em: 27 jun. 2021

EPE. **Fontes de Energias**. 2021 Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/fontes-de-energia>. Acesso em 23 jul. 2021.

FADIGAS, E. A. **Energia Eólica**. Barueri, SP: Editora Manole, 2011. 9788520446539. Disponível em:

<https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788520446539/>. Acesso em: 2021 ago. 06.

FARRELL, C. C.; *et al.* Technical challenges and opportunities in realising a circular economy for waste photovoltaic modules. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 128, n. 109911, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109911>. Acesso em: 25 nov. 2021.

MALDONADO, F. C. Introduction to Blockchain and Ethereum: **Use Distributed Ledgers to Validate Digital Transactions in a Decentralized and Trustless Manner**. Birmingham: Packt Publishing, 2018. Disponível em: <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=e000xww&AN=1905960&lang=pt-br&site=eds-live&scope=site>. Acesso em: 23 jul. 2021.

GALLAGHER, J.; *et al.* Adapting Stand-Alone Renewable Energy Technologies for the Circular Economy through Eco-Design and Recycling. **Journal Of Industrial Ecology**. v. 23, n. 1, p. 133-140, 10 nov. 2017. Wiley. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1111/jiec.12703>. Acesso em: 25 jul. 2021.

GENTILINI, E.; SALT, M. **Circular business models for Australia's solar photovoltaics industry**. 2019. Disponível em: <https://www.arup.com/perspectives/publications/promotional-materials/section/circular-business-models-for-australia-solar-photovoltaics>. Acesso em: 25 nov. 2021.

HEPP, T. *et al.* **Securing physical assets on the blockchain: linking a novel object identification concept with distributed ledgers**. CryBlock, v. 531, n. 7595, p. 60-65, 23 jun. 2018. Springer Science and Business Media LLC. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1145/3211933.3211944>. Acesso em: 23 jul. 2021

HOEPMAN, J.-H. **Distributed Double Spending Prevention**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <https://arxiv.org/pdf/0802.0832v1.pdf>. Acesso em: 28 jun. 2021.

KATZ, J., LINDELL, Y. **Introduction to Modern Cryptography**. Boca Raton, Usa: CRC Press, 2015. 578 p.

KHALILI, S.; *et al.* **Impact of Blockchain Technology on Electric Power Grids – A case study in LO3 Energy**. 8 jun. 2021. Disponível em: <https://arxiv.org/pdf/2106.05395.pdf>. Acesso em: 16 mar. 2022.

KHUAT, T. **Developing a frontend application using ReactJS and Redux**. Dissertação (Degree Programme in Business Information Technology Bachelor's) — Laurea University of Applied Sciences, Leppävaara, 2018. Disponível em: https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/150837/Tung_Khuat_1301747_Thesis.pdf?sequence=1. Acesso em: 06 ago. 2021.

LAURENCE, T. **Blockchain para Leigos**. Rio de Janeiro, RJ: Alta Books Editora, 2019. p.214

LEE, C; *et al.* Sustaining the low-carbon emission development in Asia and beyond: Sustainable energy, water, transportation and low-carbon emission technology. **Journal of Cleaner Production**, v.146, p.1 –13. Mar. 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.11.144>. Acesso em: 05 nov. 2021.

LIMA, J. P. S. **Validação de dados através de hashes criptográficos**: uma avaliação na perícia forense computacional brasileira. 2015. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/bitstream/123456789/15966/1/Mestrado%20-%20Cln-UFPE%20-%20Jos%C3%A9%20Paulo.pdf> Acesso em: 18 de out. 2021.

LO3 ENERGY. Exergy. **Electric Power Technical Whitepaper**. 14 dec. 2017. Disponível em: <http://www.truevaluemetrics.org/DBpdfs/Initiatives/Exergy/Exergy-2018-Technical-Whitepaper-v8.pdf>. Acesso em: 16 mar. 2022.

MATIAS-PEREIRA. **Manual de Metodologia da Pesquisa Científica**. 4ºEd. São Paulo: Grupo GEN, 2019. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788597008821/>. Acesso em: 29 nov. 2021.

MAYER BROWN. Informativo Energia Elétrica. **Lei nº 14.300/2022**: Marco Legal da Geração Distribuída. 13 jan. 2022. Disponível em: <https://www.mayerbrown.com/-/media/files/perspectives-events/publications/2022/01/informativo-do-setor-eletrico--lei-n-14300-de-2022--marco-legal-da-gd.pdf>. Acesso em: 27 abr. 2022.

MCCUBBIN, G. **Intro to Web3.js**: Ethereum blockchain developer crash course. [S. l.], 13 maio 2022. Disponível em: <https://www.dappuniversity.com/articles/web3-js-intro>. Acesso em: 28 maio 2022.

MONTAKHABI, M.; *et al.* Sharing Beyond Peer-to-peer Trading: collaborative (open) business models as a pathway to smart circular economy in electricity markets. 2020 16Th **International Conference On Distributed Computing In Sensor Systems**, [S.L.], p. 482-489, maio 2020. IEEE. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1109/dcoss49796.2020.00081>. Acesso em: 23 jul. 2021.

MONTAKHABI, M.; *et al.* **An Ecosystem View of Peer-to-Peer Electricity Trading: scenario building by business model matrix to identify new roles**. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en14154438>. Acesso em: 26 jul. 2021.

MORALIS. **Ethereum Gas Fees**: The Ultimate 2022 Guide. Ethereum Gas Fees. 12 jan. 2022. Disponível em: <https://moralis.io/ethereum-gas-fees-the-ultimate-2022-guide><http://www.sebrae.com.br/sites/PortalSebrae/artigos/entenda-a-importancia-da-normalizacao-para-o-seu-negocio>. Acesso em: 10 mai. 2022.

MOREIRA, S *et al.* **Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética**. Rio de Janeiro: LTC, 2019 Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788521633785/>. Acesso em: 23 Jul 2021

NAKAMOTO, S. **Bitcoin**: A Peer-to-Peer Electronic Cash System. 2008. Disponível em: <https://bitcoin.org/bitcoin.pdf> . Acesso em: 22 jul. 2021

NATAJARAN, H.; KRAUSE, S.; GRADSTEIN, H. **Distributed Ledger Technology and Blockchain**. FinTech Note; No. 1. World Bank, Washington, DC. World Bank. 2017. Disponível em: <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/29053>. Acesso em: 20 fev. 2022

OBRECHT, M.; SINGH, R.; ZORMAN, T. Conceptualizing a new circular economy feature – storing renewable electricity in batteries beyond EV end-of-life: the case of slovenia. **International Journal of Productivity And Performance Management**, [S.L.], v. 50, n. 1, p. 1-16, 4 jun. 2021. Emerald. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1108/ijppm-01-2021-0029>. Acesso em: 25 jul. 2021.

ONU BRASIL (Organização das Nações Unidas Brasil). **Sobre o nosso trabalho para alcançar os objetivos de desenvolvimento sustentável**. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>. Acesso em: 14 jul. 2021.

OSGOOD, R. **The Future of Democracy: Blockchain Voting**. Technical report. 2016. Disponível em: <http://www.cs.tufts.edu/comp/116/archive/fall2016/rosgood.pdf>. Acesso em: 25 nov. 2021

PINTO, M. O. **Fundamentos de Energia Eólica**. Rio de Janeiro: Grupo GEN, 2012. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/978-85-216-2193-5/>. Acesso em: 2021 ago. 06.

PWC. **Use cases for Blockchain technology in Energy Commodity Trading**. Julho, 2017. Disponível em: <https://www.pwc.com/gx/en/industries/assets/blockchain-technology-in-energy.pdf>. Acesso em: 27 jul. 2021

PILKINGTON, M. Blockchain technology: principles and applications. **Research Handbook on Digital Transformations**, [S.L.], p. 225-253, maio 2016. Edward Elgar Publishing. <http://dx.doi.org/10.4337/9781784717766.00019>.

PHILIPPI, A. J., REIS, L. B. **Energia e sustentabilidade**. Barueri, SP: Editora Manole, 2016. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9786555761313/>. Acesso em: 23 Jul 2021.

PORTAL SOLAR. **Energy Paradigm shift by implementing decentralized communities: A Case Study of the Brooklyn Microgrid**. 2021. Disponível em: <https://solaredition.com/energy-paradigm-shift-by-implementing-decentralized-communities-a-case-study-of-the-brooklyn-microgrid/>. Acesso em: 08 mar. 2022.

PORTAL SOLAR. **Como Funciona a Energia Solar**. 2022. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/como-funciona-energia-solar.html>. Acesso em: 08 mar. 2022.

POWERLEDGER. **Power Ledger White Paper**. 29 jun. 2019. Disponível em: <https://www.powerledger.io/company/power-ledger-whitepaper>. Acesso em: 16 mar. 2022.

POWERS, S. **Learning JavaScript: Add Sparkle and Life to Your Web Pages**. O'Reilly Media, 2008. ISBN 9780596554378. Disponível em: <http://books.google.com.br/books?id=3On-moJDuo0C>. Acesso em: 01 ago. 2021

RODRIGUES, B.; *et al.* Energia solar: metodologia para avaliação do local de instalação de sistema fotovoltaico fomentando a educação ambiental. **Revista Brasileira de Educação Ambiental**. [S.L.], v. 13, n. 3, p. 233-244, 30 set. 2018. Universidade Federal de São Paulo. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.34024/revbea.2018.v13.2501>. Acesso em: 11 fev. 2022

ROURGHGARGEN, T. **Transaction Fee Mechanism Design for the Ethereum Blockchain: An Economic Analysis of EIP-1559**. 1 dec. 2020. Disponível em: <http://timroughgarden.org/papers/eip1559.pdf>. Acesso em: 17 mai. 2022.

SILVA, E. C.; *et al.* A qualidade da energia elétrica no contexto da quarta revolução industrial - indústria 4.0. **Xxxvii Encontro Nacional de Engenharia de Produção**, Joinville, out. 2017. Anual. Disponível em: http://www.abepro.org.br/biblioteca/TN_STP_239_389_32636.pdf. Acesso em: 28 jun. 2021.

SILVA, R. D. S. S. Contextualização do setor elétrico brasileiro e o planejamento da infraestrutura no longo prazo. Brasília: **Ipea**, v. 69, jun. 2020. Anual. Disponível em: https://www.ipea.gov.br/portal/images/stories/PDFs/nota_tecnica/200624_nt_diset_69.pdf. Acesso em: 06 nov. 2021.

SKVORC, B. Ethereum: How Transaction Costs are Calculated. **Blockchain Ethereum**. 24 mai. 2018. Disponível em: <https://www.sitepoint.com/ethereum-transaction-costs/>. Acesso em: 10 mai. 2022.

SEHNEM, S.; *et al.* Rumo à Economia Circular: sinergia existente entre as definições conceituais correlatas e apropriação para a literatura brasileira. **Revista Eletrônica de Ciência Administrativa**, [S.L.], v. 18, n. 1, p. 35-62, 1 jan. 2019. IBEPES (Instituto Brasileiro de Estudos e Pesquisas Sociais). Disponível em: <http://dx.doi.org/10.21529/recadm.2019002>. Acesso em: 23 jul. 2021.

STAHEL, W. R.; *et al.* The circular economy. *Nature*, [S.L.], v. 531, n. 7595, p. 435-438, 23 mar. 2016. **Springer Science and Business Media LLC**. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1038/531435a>. Acesso em: 23 jul. 2021.

SZABO, N. Formalizing and Securing Relationships on Public Networks. **First Monday**, vol. 2, no 9, setembro de 1997. Disponível em: <https://doi.org/10.5210/fm.v2i9.548>. Acesso em: 25 nov. 2021

TAKENOBU, T. Exploring Some Mental Models and Implementations. **Ethereum EVM Illustrated**. 1 mar. 2018. Disponível em: https://takenobu-hs.github.io/downloads/ethereum_evm_illustrated.pdf. Acesso em: 10 mai. 2022.

TIEPOLO, G. M.; *et al.* Atlas de energia solar do estado do paraná - resultados. **Revista Brasileira de Energia Solar**, Brasil, v. 9, n. 9, p. 01-10, jul. 2018. Disponível em: <https://rbens.emnuvens.com.br/rbens/article/view/229>. Acesso em: 22 jul. 2021.

VOLGESTELLER, F; BUTERIN, V. **IEP-20: Token Standard**. Disponível em: <https://github.com/ethereum/EIPs/blob/master/EIPS/eip-20.md>. Acesso em: 25 nov. 2021.

WARD, C. **Patricia Tree**. nov. 2020. Disponível em: <https://eth.wiki/fundamentals/patricia-tree>. Acesso em: 30 mar. 2022.

WAZLAWICK, R. S. **Metodologia de pesquisa para ciência da computação**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2009. Disponível em: https://tsxvpsbr.dyndns.org/arquivos/UFFS/Metodologia%20De%20Pesquisa%20Cie nciaDaComputacao%20_%20TCC1.pdf. Acesso em: 10 nov. 2021.

WOOD, G. **Ethereum: A Secure Decentralised Generalised Transaction Ledger**. Berlin Version: b2d0dbf, 2022.

WOOD, G. **Ethereum Yellow Paper: A Formal Specification of Ethereum, a Programmable Blockchain**. Disponível em: <https://files.gitter.im/ethereum/yellowpaper/Vlyt/Paper.pdf>. Acesso em: 28 jul. 2021

YILFZBASI, A. Blockchain and Renewable Energy: Integration Challenges in Circular Economy Era. **Renewable Energy**, vol. 176, ano 2021, p. 183–197. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960148121007291?via%3Dihub>. Acesso em: 28 jun 2021.

ZELENY, M. Autopoiesis and self-sustainability in economic systems. **Human Systems. Management**, Vol. 16, pp. 251-262. Disponível em: <https://cepa.info/fulltexts/1212.pdf>. Acesso em: 25 nov. 2021.