

COMÉRCIO DE ENERGIA ELÉTRICA UTILIZANDO A BLOCKCHAIN

Lucas Coutinho Lopes*
Simão Pedro Fernandes Santana**
Wallace Ferreira Medina***
Ruth Lopes Negreiros****

RESUMO

Nos dias atuais, o cenário do mercado de energia elétrica é caracterizado por sua complexidade e dependência de intermediários, incluindo agentes comerciais, fornecedores de logística, bancos, reguladores e corretores. Nesse contexto, a CCEE é responsável pelo registro dos contratos assinados entre compradores e vendedores, bem como pela medição dos montantes físicos de energia transacionados pelos agentes. O objetivo deste trabalho é utilizar os contratos inteligentes para viabilizar o comércio de energia elétrica de forma transparente, segura e com melhor custo-benefício. Todos os desafios propostos baseiam-se na leitura e nas aplicações do tema já vigentes, trazendo um paralelo entre o atual cenário e como a *Blockchain* pode modificá-lo. O estudo foi conduzido através de uma pesquisa bibliográfica com base em materiais elaborados e empresas no ramo, que buscaram entender a influência da tecnologia da *blockchain* no setor elétrico, como um *marketplace* descentralizado, focado em estreitar as relações entre prosumidores e consumidores.

Palavras Chaves: Blockchain, Energia Elétrica, e Smart Contracts.

ABSTRACT

In current times, the scenario of the electricity market is characterized by its complexity and dependence on intermediaries, including commercial agents, logistics providers, banks, regulators, and brokers. In this context, CCEE is responsible for registering contracts signed between buyers and sellers, as well as measuring the physical amounts of energy transacted by the agents. The aim of this work is to use smart contracts to enable the trade of electrical energy in a transparent, secure, and cost-effective manner. All proposed challenges are based on the reading and applications of the already existing theme, drawing a parallel between the current scenario and how blockchain can modify it. The study was conducted through a bibliographic research based on materials developed and companies in the field, seeking to understand the influence of blockchain technology in the electrical sector as a decentralized marketplace, focused on strengthening the relationships between prosumers and consumers.

Keywords: Blockchain, Electric Energy, and Smart Contracts.

*Rede de Ensino Doctum – Unidade Teófilo Otoni –aluno.lucas.coutinho1@doctum.edu.br–
Graduando em 2023.

**Rede de Ensino Doctum – Unidade Teófilo Otoni – aluno.simao.santana@doctum.edu.br–
Graduando em 2023.

***Rede de Ensino Doctum – Unidade Teófilo Otoni –aluno.wallace.medina@doctum.edu.br–
Graduando em 2023.

**** Rede de Ensino Doctum – Unidade Teófilo Otoni –ruth.lopes@doctum.edu.br– Orientadora.

1.Introdução

Atualmente, a Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE) desempenha o papel de operadora do mercado brasileiro de energia elétrica como uma entidade sem fins lucrativos, estabelecendo um ambiente de negociação competitivo, sustentável e seguro. Nesse contexto, a CCEE é responsável pelo registro dos contratos assinados entre compradores e vendedores, bem como pela medição dos montantes físicos de energia transacionados pelos agentes. Disponível em: <https://www.ccee.org.br/web/guest/sobrenos>; 24-09-2023.

Fazendo uma comparação com as atribuições da CCEE, o comércio de energia utilizando a *blockchain*, desenvolve um ambiente equivalente para viabilizar transações entre agentes no setor varejista de energia, envolvendo consumidores e produtores que optam por gerar sua própria energia através de painéis fotovoltaicos, usando o que precisam e comercializando o excedente da energia elétrica renovável de maneira ágil e sem obstáculos, incentivando a expansão da capacidade fotovoltaica instalada e a aquisição de energia limpa para clientes de baixa tensão através da *blockchain*. Essas pessoas que produzem e comercializam o excedente de sua energia são os prosumidores, que nos dias atuais recebem apenas créditos da distribuidora pelo excedente de energia, observa-se que não há incentivo para expansão da capacidade fotovoltaica.

Desde então, a tecnologia *blockchain* emergiu como uma das inovações mais significativas do século XXI. Nos dias atuais, o cenário do mercado de energia elétrica é caracterizado por sua complexidade e dependência de intermediários, incluindo agentes comerciais, fornecedores de logística, bancos, reguladores e corretores.

O objetivo deste projeto é reduzir custos financeiros no comércio de energia elétrica por meio da tecnologia *blockchain*. Isso envolve a aplicação da *blockchain* para registrar transações com transparência e segurança, criar contratos inteligentes que se auto executam, facilitar a gestão da geração distribuída e verificar a origem sustentável da eletricidade. Espera-se simplificar processos, eliminar intermediários e promover a eficiência, confiabilidade e segurança no setor elétrico, contribuindo para a redução de custos financeiros em contratações e leilões de energia elétrica.

A tecnologia *blockchain* tem sido amplamente discutida como uma das principais inovações tecnológicas com potencial para revolucionar a forma como as transações são realizadas em diferentes setores, incluindo o comércio de energia

elétrica. A utilização de *blockchain* no setor de energia elétrica proporciona uma maior eficiência, transparência e segurança para as transações, permitindo a realização de negociações diretas entre produtores e consumidores, sem a necessidade de intermediários.

Ainda no contexto que engloba as vantagens de se utilizar essa tecnologia, as aplicações que empreguem a *blockchain* podem oferecer rapidez, processos automatizados e possibilidade de redução de custos, segundo o relatório comercial da Deloitte (GREWAL-CARR; STEPHEN, 2016). O que explica a pergunta problema. Como a comercialização de energia por meio da tecnologia abordada, pode auxiliar na redução de custos financeiros e trazer mais transparência no ambiente de contratação da energia elétrica?

As áreas mais promissoras para a *blockchain* no setor elétrico são infraestrutura para carregamento de mobilidade elétrica, certificação de produção de energia, modelos de vizinhança e microrredes, mercados inteligentes locais e transações de energia e gestão de ativos (STRÜKER, ALBRECHT, REICHERT, 2019, pag. 32).

A aplicação nos mercados de energia elétrica oferece um impacto altamente benéfico para os agentes, instituições e associações envolvidas no setor elétrico brasileiro, resultando na significativa redução de custos por meio da otimização de seus processos. Além disso, o uso da tecnologia *blockchain* em contratos inteligentes tem o potencial de aprimorar a segurança do sistema elétrico, reduzir erros de armazenamento e mitigar os riscos de fraudes. Isso é alcançado por meio de uma auditoria confiável e da garantia da execução precisa dos contratos inteligentes.

Neste cenário descrito com base na bibliografia atual e empresas que já atuam no ramo como *L03 Energy*, *Power Ledger*, entre outras, observa-se que a tecnologia *Blockchain* é de cunho importante para o processo de transformação do setor elétrico, em especial na criação de novas formas de relacionamento no mercado e incentivando a geração de energia renovável, assim novos ambientes de comercialização teriam o potencial de criar um ambiente virtuoso para contínuo crescimento do tema, apesar dos desafios, da pouca bibliografia já que a tecnologia é recente e inovadora, é uma alternativa para a redução de custos e para a segurança das transações comerciais e maior velocidade nas transações.

2.Referencial Teórico

2.1 Blockchain, conceitos iniciais:

Segundo a Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE, 2020), a tecnologia *Blockchain* é uma forma de tecnologia de livro-razão distribuído, que atua como um registro aberto e autenticado de transações de uma parte para outra (ou múltiplas partes), e que não é armazenado ou controlado por uma autoridade central. Entenda-se livro-razão (*ledger*) como um banco de dados distribuído e replicado em uma rede *Peer-to-peer* (P2P), em que os registros são adicionados cronologicamente, mas nunca são alterados ou deletados, lembrando realmente um livro de lançamentos contábeis, justificando a metáfora.

O termo *blockchain*, em tradução literal, significa cadeia de blocos. Ou seja, esta rede é composta por uma série de blocos encadeados entre si. Cada bloco possui um conteúdo e uma espécie de impressão digital. O bloco seguinte terá a impressão digital do bloco anterior, o seu próprio conteúdo e também a sua própria impressão digital. Essa impressão digital é uma função chamada de “*hash*”, que funciona como um “recibo” que contém todas as informações da transação realizada, transformando uma grande quantidade de dados em informações sucintas e em pequena quantidade de forma mais simples para os usuários.

Todas essas informações ficam gravadas no *ledger*, que é uma espécie de livro-razão da *blockchain*. Na contabilidade, o livro-razão é usado para coletar e registrar todos os dados cronológicos referentes a transações financeiras. No caso da *blockchain*, é a mesma coisa. Se estivermos tratando de *bitcoin* ou outras criptomoedas, as transações são gravadas no *ledger* e não podem ser apagadas.

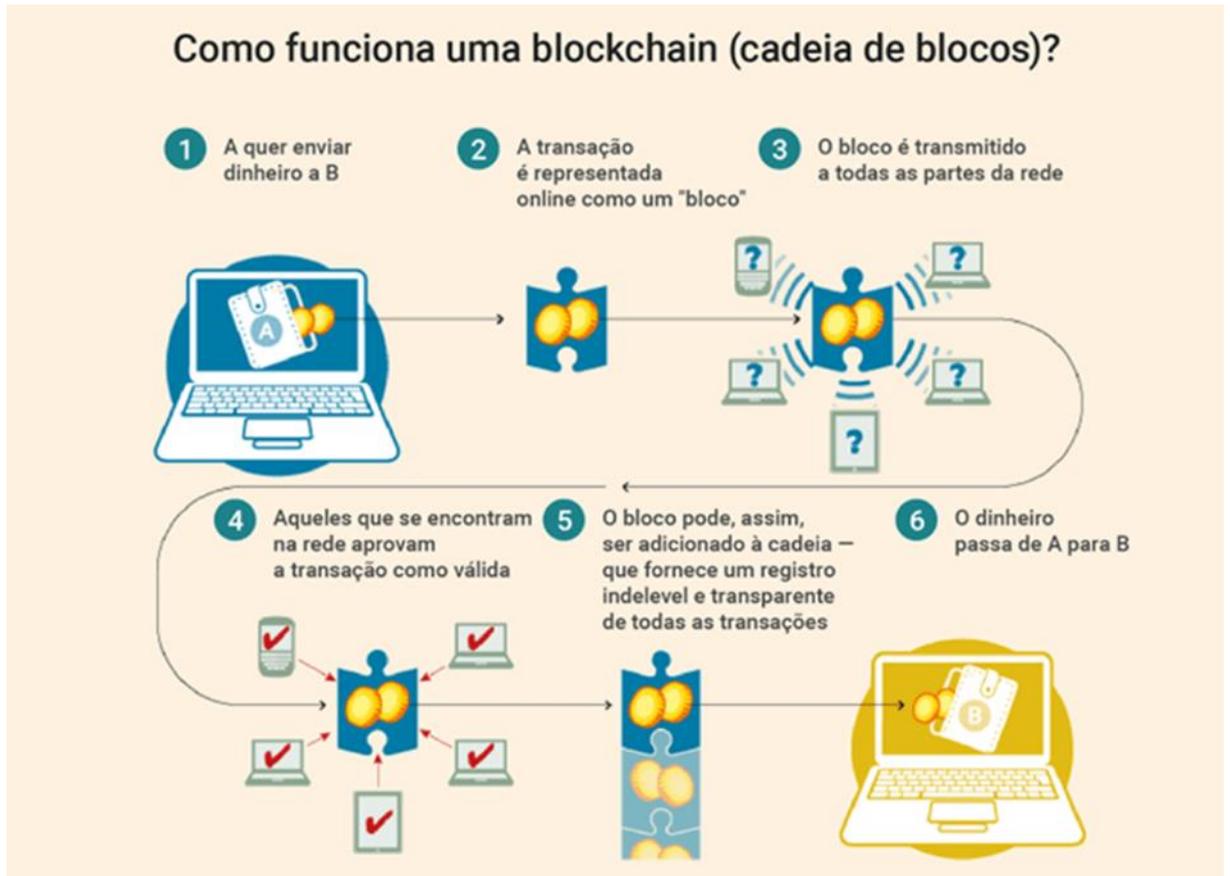


Figura 1: Explicando uma transação dentro da blockchain.

Fonte: Disponível em: ihodl.com/tutorials/2017-06-29/guia-de-blockchain-para-principiantes.

Na sua versão completa, uma rede *blockchain* é composta pelas seguintes características elementares (FURLUNGER e UZUREAU, 2019):

- **Distribuição:** os nós participantes da rede *Blockchain* estão localizados fisicamente distantes uns dos outros e estão conectados em uma rede. Cada participante opera um nó completo e mantém uma cópia completa do livro de registros, que é atualizada com as novas transações à medida que ocorrem. Os nós são as máquinas pertencentes ou usadas pelos participantes e equipadas para executar o algoritmo de consenso. Qualquer participante pode revisar qualquer parte do livro de registros, mas não pode alterá-lo, exceto sob circunstâncias prescritas;

- **Encriptação:** *Blockchain* usa tecnologias criptográficas como chaves públicas e privadas para registrar os dados nos blocos de forma segura;

- **Imutabilidade:** as transações concluídas são assinadas criptograficamente, com registro de data e hora e adicionadas sequencialmente ao livro razão. Os registros não podem ser corrompidos ou alterados, a menos que os participantes concordem com a necessidade de fazê-lo.

- **Tokenização:** as transações e outras interações em uma *Blockchain* envolvem a troca segura de valor na forma de *tokens*. Os mercados digitais podem funcionar de forma mais eficaz com *tokens* e precisam criá-los (*tokenização*) por vários motivos. Os *tokens* podem funcionar como representações digitais de ativos físicos, como um mecanismo de recompensa para incentivar os participantes da rede ou para permitir a criação e troca de novas formas de valor e habilitar a liquidação de transações entre os participantes;

- **Descentralização:** tanto as informações da rede quanto as regras de funcionamento são mantidas por vários computadores, ou nós, na rede distribuída. Na prática, a descentralização significa que nenhuma entidade isolada controla todos os computadores ou as informações, ou dita as regras. Cada nó mantém uma cópia criptografada idêntica do registro da rede. Um mecanismo de consenso operado por cada nó verifica e aprova as transações. Essa estrutura descentralizada e orientada por consenso elimina a necessidade de governança por uma autoridade central e atua como um sistema de segurança contra fraudes e transações incorretas.

Do ponto de vista de aplicação, a tecnologia *blockchain* passou por uma grande evolução com a possibilidade de uso dos contratos inteligentes (*smart contracts*). Eles são programas de computador replicados e executados por todos os nós da rede, ou por um conjunto predeterminado de nós denominados validadores.

Um Contrato Inteligente ou *Smart Contract* é a tradução no código de um contrato que pode verificar automaticamente o cumprimento de certas condições (verificação de dados básicos do contrato) e executar ações automaticamente (ou permitir que certas ações possam ser executadas) quando as condições específicas entre as partes são atingidas e verificadas (CHRISTIDIS; DEVETSIKIOTIS, 2016).

A imagem a seguir é um exemplo de uma transação utilizando contrato inteligente, onde pode se observar a descrição todos os detalhes da transação, o *hash*, exemplificado na imagem como “*Transaction Hash*” que é um código alfanumérico único e irreversível que identifica a transação, código esse público para todas as transações realizadas dentro da *blockchain*, é a informação mais importante, como um “código de barra digital”. Outras informações importantes como status, a data e hora da transação, endereço de ambas as partes da negociação, o *token* (criptomoeda ou ativo) utilizado na mesma e a rede utilizada para realizar a transação, também são informações públicas para todas as transações realizadas.

Transaction Hash: 0xc9869129c66f39762bcb0b34086e525d15b124421c6968df1d5a19fc0bdd874a

Status: Success

Block: 18502017 (21634 Block Confirmations)

Timestamp: 3 days 42 mins ago (Nov-04-2023 11:43:35 PM +UTC)

Transaction Action: Transfer 0.03632648039235099 ETH To 0xBB3AFD...EB0FE248

Sponsored: Anúncio removido. Saiba mais

From: titanbuilder.eth (Titan Builder)

To: 0xBB3AFDe35eB9f5FeB5377485a3bD18a3EB0FE248

Value: 0.03632648039235099 ETH \$68.50

Transaction Fee: 0.000275586631257 ETH \$0.52

Gas Price: 13.123172917 Gwei (0.000000013123172917 ETH)

Figura 2: Todos os dados presentes no *Hash* das transações.

Fonte: <https://etherscan.io/tx/0xc9869129c66f39762bcb0b34086e525d15b124421c6968df1d5a19fc0bdd874a>, 04 de Novembro de 2023.

2.2 Setor Elétrico Brasileiro, Comercio Livre de Energia

O setor elétrico brasileiro é formado por agentes de geração de energia elétrica, de transmissão, distribuição, comercialização, por consumidores e pelos agentes institucionais. Os agentes de geração de energia elétrica são as concessionárias de serviço público de geração que exploram ativos de geração a título de serviço público; os produtores independentes que produzem energia com finalidade de comercialização; e os autoprodutores que produzem energia com finalidade de consumo próprio, podendo comercializar o excedente mediante autorização da ANEEL.

Os agentes de comercialização de energia elétrica são as empresas comercializadoras as quais representam comercialmente outro agente, os consumidores livres e/ou especiais que são consumidores com demanda mínima contratada, e os importadores e exportadores de energia. Os consumidores cativos, ou regulados, estão na área de concessão ou permissão dos agentes distribuidores. Esses não comercializam energia elétrica, pois sua tarifa é regulada pela ANEEL e repassada pelo agente distribuidor ao consumidor.

A CCEE é uma instituição de direito privado sem fins lucrativos que tem como objetivo viabilizar a comercialização de energia elétrica no ACR (Ambiente de

Contratação Regulada) e no ACL (Ambiente de contratação Livre). Suas atividades incluem manter os registros dos contratos, coletar dados de medição e contabilização em ambos os ambientes.

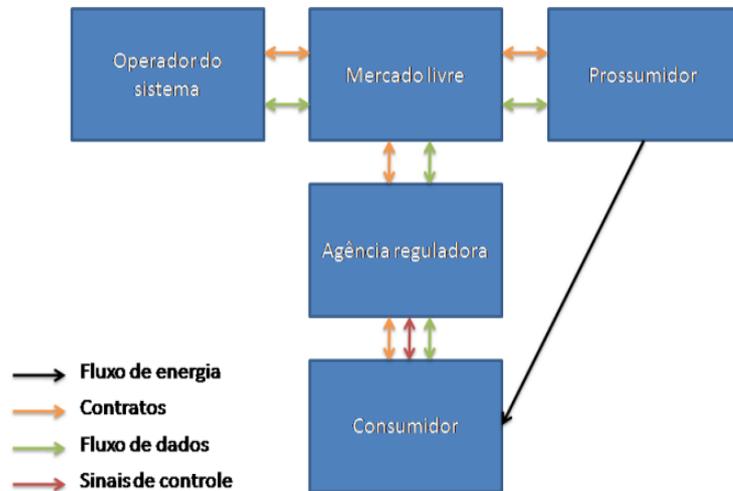


Figura 3: Atual modelo de comercialização de energia elétrica brasileiro

Fonte: Novo Modelo de Comercialização de Energia Elétrica Utilizando *Blockchain*, um Estímulo à Geração Distribuída e aos Veículos Elétricos, Machado, S; Rampinelli, Giuliano; Gagliotti, Martín Augusto.

2.3 Utilização da tecnologia blockchain no setor elétrico

Os sistemas de energia elétrica tradicionais ao redor do mundo são fortemente regulamentados e, geralmente, operados de forma centralizada. A *Tokio Electric Power Company* (TEPCO) do Japão e a *Eon*, na Alemanha, têm lançado suas próprias iniciativas de *Blockchain* com parceria das *startups*. Diversas empresas possuem as suas próprias usinas e comercializam a produção de energia em mercados atacadistas. Outras, todavia, operam redes de transmissão e distribuição e vislumbram a inserção da *blockchain* para ajudá-los com a complexidade crescente dos sistemas elétricos. Em face da predominância de empresas estatais, iniciativas da tecnologia patrocinadas pelo setor público possuem maior chance de sucesso (LIVINGSTON et al., 2018).

As iniciativas estão presentes em todos os continentes e enfrentarão uma miríade de regimes regulatórios e características de sistemas elétricos que possuem muitos desafios, mas com grandes oportunidades. Na Figura 4 é possível visualizar as duas principais categorias com potencial de aplicação da *blockchain* no setor de

energia elétrica: transações P2P (36%) e transações em Mercado Atacadista de Energia. (24%).

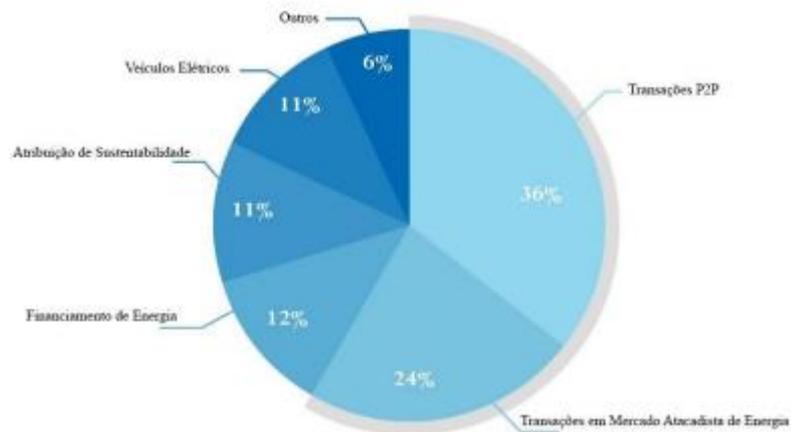


Figura 4: Principais categorias com potencial para a Blockchain.

Fonte: Adaptado de Livingston et al. (2018).

O uso da tecnologia blockchain permitirá a comercialização de energia elétrica sem intermediários, entre consumidores e/ou prosumidores (produz e consome) de uma maneira segura, descentralizada e altamente eficiente. Além disso, a comercialização de energia elétrica *peer-to-peer* (é uma arquitetura de rede em que computadores ou dispositivos se comunicam diretamente entre si, sem a necessidade de um servidor central. Cada participante pode agir como cliente e servidor, permitindo a troca direta de informações, recursos ou serviços. É comumente associado a sistemas de compartilhamento de arquivos e comunicação descentralizada), fornece incentivos financeiros e socioeconômicos para a integração e expansão da energia renovável produzida localmente. (MENGELKAMP et al., 2018)

A *blockchain* se tornou uma ferramenta de gestão para aplicações no setor de energia elétrica. Entre março de 2017 e março de 2018, *startups* ao redor do mundo arrecadaram cerca de 300 milhões de dólares para aplicar os conceitos da *blockchain* no setor de energia elétrica de diversas formas. (LIVINGSTON et al., 2018).

Dentre as possíveis aplicações no setor de energia elétrica, as principais podem ser organizadas da seguinte forma: Comercialização de energia elétrica em *Smart Grids*, Geração Distribuída, Veículos Elétricos e *Smart home*. De acordo com um estudo de ANDONI et al. (2019), são identificados mais de 140 projetos de inovação em *blockchain* e iniciativas de pesquisa no setor de energia, aproximadamente, um em cada três casos de uso é sobre comércio de energia

descentralizado, que inclui iniciativas de comércio por atacado, varejo e P2P de energia.

2.4 Um novo modelo de comercialização de energia elétrica

Com a crescente inserção de painéis fotovoltaicos em residências, a aplicação mais óbvia da *blockchain* é transformar a rede elétrica em uma rede P2P para que os clientes possam transacionar o excedente de eletricidade gerado entre si. Pode ser utilizada para a criação de novos mercados de energia que reúnem recursos de GD para auxiliar no equilíbrio da rede elétrica. Os atuais mercados atacadistas definem os preços para grandes blocos de energia, com base na demanda em uma determinada região e na capacidade de transmissão (LIVINGSTON et al., 2018).

De acordo com o estudo realizado por Ferreira e Martins (2018) sobre um modelo de comercialização de energia para microgeração, é possível concluir que a tecnologia *blockchain* oferece benefícios significativos para a participação real dos consumidores no mercado de energia. Isso ocorre porque os consumidores atuam como facilitadores na formação de comunidades de energia, promovendo maior transparência e confiança no sistema de mercado de energia. Além disso, a tecnologia *blockchain* assegura um alto nível de segurança, integridade e resiliência, enquanto também garante a responsabilidade e a preservação dos requisitos de privacidade.

Não há atores centrais, os dados são transacionados por *smart contracts* e a *blockchain* garante a segurança destes dados. O usuário da unidade consumidora pode efetuar as transações por meio de um aplicativo em seu dispositivo móvel, por exemplo.

Assim como há troca de dados de contratação de energia, há a troca de energia elétrica pela rede de distribuição. Quanto à infraestrutura local, estima-se que as redes de distribuição de energia estejam cada vez mais transitivas para que possa receber esta digitalização.

Algumas empresas já utilizam modelos parecidos, e desenvolvem trabalhos na área, em destaque *Power Ledger*, de acordo com o *whitepaper* da empresa, o ecossistema *Power Ledger* suporta mais de dez classes de aplicativos, como negociação P2P (*peer-to-peer*), varejista neo, *microgrid*, liquidação de mercado atacadista, gestão de mercado distribuído e mais. Consequentemente, uma das aplicações da plataforma capacita os consumidores a negociar eletricidade entre si.

Com seu sistema de reconciliação e liquidação sem confiança, os consumidores também recebem pagamentos em tempo real. Assim, a negociação P2P visa beneficiar os consumidores ao selecionar uma fonte de energia limpa e negociar com seus vizinhos para receber mais receitas do excesso de energia. Como todas as transações estão em uma *blockchain*, o processo é transparente com um baixo custo de liquidação. Como resultado, os consumidores obtêm contas de energia mais baixas e melhores retornos para seu investimento em energias renováveis.

Plataforma desenvolvida é utilizada por geradores que possuem certificados para vender ou por concessionárias, utilizando produto chamado *TraceX* que permite que os usuários negociem de maneira simples, segura e eficiente, *TraceX* segundo a própria empresa é escalável para facilitar mais de 50.000 transações por segundo.

Outra forte empresa no ramo a se destacar é *LO3 Energy* esta empresa desenvolveu o conceito de que não se deve considerar apenas o kWh como o único atributo do serviço de suprimento de energia, sendo igualmente crucial saber onde, como e quando esse kWh foi produzido, assim, aspectos como a localização dos pontos de geração e consumo, o acoplamento temporal dos momentos de geração e consumo, e os atributos da fonte da geração passam a ter uma maior relevância. A visão da LO3 considera tais atributos como essenciais para a constituição de *Marketplaces* descentralizados (são ambientes online de comércio nos quais a operação não é controlada por uma entidade central, mas distribuída entre os participantes da rede, frequentemente usando tecnologia *blockchain*, modelo é comum em setores como criptomoedas e arte digital), para a comercialização da geração distribuída diretamente por consumidores e prosumidores, que serve como base para desenvolvimento do trabalho apresentado.

A redução de custos é um dos potenciais da *blockchain* no setor elétrico mais ressaltados na literatura (DICK; PRAKTIKNJO, 2019; MYLREA; GOURISETTI, 2017; O'DONOVAN; O'SULLIVAN, 2019; VAN CUTSEM et al., 2020; WU; TRAN, 2018), além de custos de transação, podem reduzir tempos de liquidação, substituir intermediários por modelos de consenso, aumentando a lucratividade e minimizando custos para participantes que usam sofisticada inteligência de mercado (WANG et al., 2017).

3. Materiais e Métodos

O estudo foi conduzido por meio de revisões bibliográficas das tecnologias associadas à abordagem inovadora de venda de eletricidade no cenário global do setor elétrico. Primeiramente, realizou-se um levantamento de dados buscando compreender como o processo acontece. A partir desse ponto, o foco principal da pesquisa centrou-se na aplicação da tecnologia blockchain na comercialização de energia elétrica, enquanto as informações secundárias abordaram o impacto dessa tecnologia na geração distribuída de energia solar e na mobilidade elétrica.

O método de investigação, ou ainda delineamento da pesquisa, é o estudo de caso. Esse método possibilita o estudo intensivo de um indivíduo para obter generalizações a partir de uma análise abrangente do tópico de pesquisa (MOTTA-ROTH; RABUSKE HENDGES, 2010). Quanto à finalidade, essa pesquisa é classificada como descritiva. Segundo Vergara (2000, p.47), a pesquisa descritiva expõe as características de determinada população ou fenômeno, estabelece correlações entre variáveis e define sua natureza.

O estudo foi realizado por meio de revisões bibliográficas das tecnologias relacionadas à nova proposta de comercialização de energia no setor elétrico. Considerou-se como informação principal a tecnologia blockchain aplicada à comercialização de energia elétrica e, como informações secundárias, a influência dessa tecnologia na geração distribuída fotovoltaica e em veículos elétricos.

Para atingir os objetivos, o estudo foi conduzido com pareamento bibliográfico, desenvolvido por meio de materiais já elaborados com a utilização de teses, dissertações, artigos, livros, jornais e sites para desenvolver e suportar os objetivos propostos pela blockchain e sua interação com o setor de energia elétrica, buscando suas vantagens e possíveis desvantagens, levando em consideração os aspectos econômicos e sustentáveis.

Após a leitura das fontes pesquisadas, as informações foram organizadas buscando mencionar os dados mais importantes para um referencial teórico de maneira clara e objetiva. Sempre correlacionando as ideias dos autores com dados da atualidade, vinculando materiais acadêmicos ministrados durante o curso, além de fornecer pontos de vista pessoais de maneira técnica.

Os objetos de pesquisa são documentos, artigos científicos e livros que auxiliem na elaboração de métricas para o setor elétrico brasileiro e assim definir e avaliar o impacto da blockchain no mercado de energia por meio da geração distribuída (GD).

O propósito desta fase é abordar dois pontos essenciais: primeiro, realizar uma análise aprofundada, estabelecer definições e avaliar as métricas nos mercados de energia, tanto livre quanto regulado, levando em consideração a presença da geração distribuída. O objetivo é adaptar essas métricas para a implementação bem-sucedida da tecnologia blockchain nesses ambientes. Em segundo lugar, foi conduzida uma investigação minuciosa sobre a legislação e regulamentação do setor elétrico brasileiro. Isso incluiu aspectos como a comercialização de energia e a geração distribuída. O foco será identificar as leis e regulamentações passíveis de alteração para viabilizar a aplicação efetiva da tecnologia blockchain nos mercados de comercialização livre e regulado, considerando também a presença da geração distribuída.

Para a investigação e avaliação das métricas de geração distribuída, foi considerado um novo ambiente de comercialização de energia elétrica, o ambiente de Contratação através da GD.

4- Resultados e discussões

Com a globalização, o Padrão-Ouro declinou em favor das Moedas Fiduciárias (como real, dólar e euro), cujo valor depende da confiança no emissor, principalmente os Bancos Centrais. Isso concedeu poder significativo a Estados e instituições financeiras, influenciando emissão de notas, regulação de taxas de juros e intervenções na economia. A blockchain, por sua vez, busca descentralização e transparência. O futuro pode envolver uma integração mais profunda entre o mercado tradicional, centrado em intermediários e regulamentações, e a *blockchain*, visando eficiência e transparência.

A *Crypto.com*, uma grande empresa de ativos digitais, divulgou um estudo sobre a medição de usuários globais de criptomoedas no dia 29 de julho de 2021, revelando que o número de usuários de criptomoedas em todo o mundo mais do que dobrou, passando de 100 milhões em janeiro para 221 milhões em junho.

A empresa destacou que a adoção de criptomoedas tem experimentado um rápido crescimento ao longo deste ano. A população de usuários de criptomoedas quase dobrou em apenas quatro meses, saindo de 106 milhões em fevereiro para 203 milhões em maio. Em comparação, levou nove meses para que o número de usuários de criptomoedas em todo o mundo atingisse 100 milhões, partindo de 65 milhões,

desde que a *Crypto.com* iniciou o monitoramento dos níveis de adoção de criptomoedas.

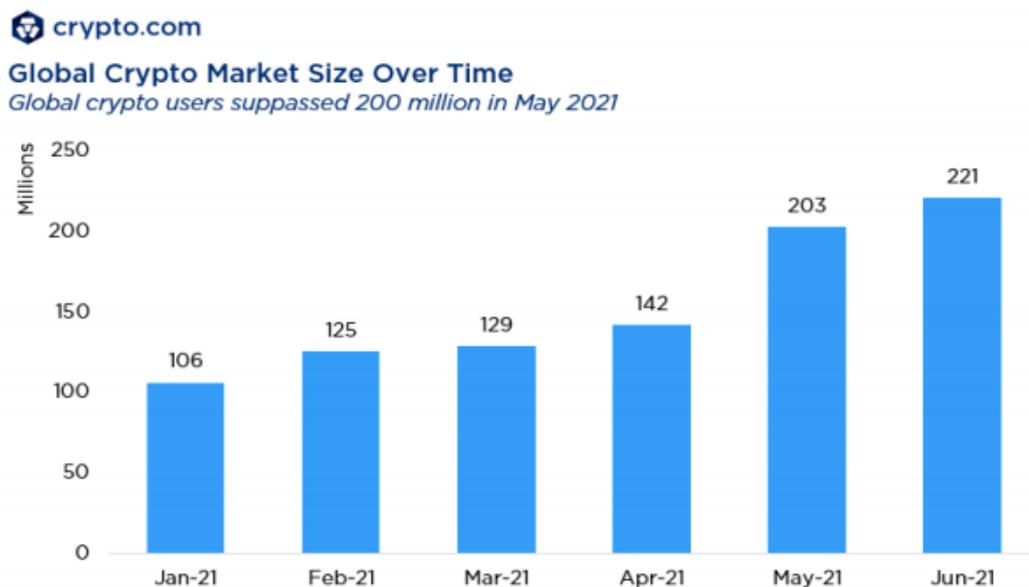


Figura 5: Crescimento do número de usuários.

Fonte: Crypto.com, Crypto Market Sizing, pag.10. HON, Henry; 2022. Acesso 24-10-2023.

O *marketplace* de energia P2P baseado em transações de blockchain traz benefícios econômicos condicionados a fatores como a tipologia e atribuições dos agentes, perfil de demanda, excedente fotovoltaico e capacidade instalada de sistemas fotovoltaicos. Estratégias de negociação também influenciam. Estudos de caso específicos são essenciais devido às peculiaridades de cada ambiente. Os benefícios incluem a redução do custo de energia para consumidores, autonomia na escolha de fontes renováveis e remuneração equilibrada dos prosumidores. O uso da *blockchain* permite a consumidores de diferentes locais adquirir energia de prosumidores de forma eficiente, garantindo o suprimento de energia renovável, complementando o modelo atual do mercado regulado.

Um estudo foi desenvolvido pelo CPQD, Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Telecomunicações, com a Copel Distribuição, em 2021 - com o respaldo de financiamento proveniente do programa de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), a tecnologia *blockchain* foi empregada no processo de concepção, desenvolvimento, testes e avaliação de um modelo transacional descentralizado. Esse modelo visa facilitar a comercialização direta de energia elétrica entre consumidores e prosumidores dentro do contexto de Geração Distribuída (GD).

De acordo com Toshioka (especialista em análise de dados), esse projeto foi desenvolvido em conformidade com o atual modelo regulatório adotado no Brasil, considerando, além disso, as iniciativas de modernização em fase de discussão na ANEEL e no Ministério das Minas e Energia (MME). Essa iniciativa resultou na conquista do 3º lugar na categoria "Descentralização" no Prêmio CIER de Inovação, realizado no Uruguai, por parte da Copel.

Trabalho desenvolvido se propôs a desenvolver uma simulação e apresentar resultados para viabilizar o estudo desenvolvido. Para tanto, foram consideradas as seguintes premissas:

- Massificação do *Marketplace* a partir de 2025 e um horizonte de análise de 10 anos (ano final em 2034);
- Mercado potencial em 2025 em torno de 7,86 TWh, conforme projetado para as classes residencial e comercial;
- Aumento médio do consumo em 1,95% a.a.,
- Penetração do *marketplace* em 2025 de 15%, crescendo linearmente até 30% em 2034;
- O percentual de atendimento da demanda pela energia do *marketplace* inicia-se em 2,1% e cresce linearmente até 15% em 2032;
- Taxa de conversão entre e-tokens e R\$ de 1:1, sendo a comissão das exchanges assumida em 2,5%;
- Receitas auferidas pelos nós mantenedores arbitradas em 4%, 4% e 2% respectivamente para a distribuidora, o gerenciador de transações e o *marketplace*, mesmos valores considerados nas demais análises.

Nestas condições, a evolução das receitas brutas dos nós mantenedores seria a mostrada na Tabela a seguir:

Tabela Evolução das Receitas dos Nós Mantenedores

	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034
Mercado potencial (TWh)	7,86	8,01	8,17	8,33	8,49	8,66	8,83	9,00	9,17	9,35
Participantes do mercado (%)	15,0%	16,7%	18,3%	20,0%	21,7%	23,3%	25,0%	26,7%	28,3%	30,0%
Consumo participante no Mkt (TWh)	1,18	1,34	1,50	1,67	1,84	2,02	2,21	2,40	2,60	2,81
Energia adquirida no Mkt (%)	2,1%	3,5%	5,0%	6,4%	7,8%	9,3%	10,7%	12,1%	13,6%	15,0%
Energia adquirida no Mkt (GWh)	24,6	47,1	74,3	106,5	144,0	187,1	236,0	291,1	352,6	420,8
Receitas Anuais (R\$ mil)										
Distribuidora	258	492	776	1.113	1.505	1.955	2.467	3.042	3.685	4.399
Marketplace	258	492	776	1.113	1.505	1.955	2.467	3.042	3.685	4.399
Gerenciador de Transações	129	246	388	557	753	978	1.233	1.521	1.843	2.199

Tabela 1: Receitas brutas dos nós mantenedores.

Fonte: Marketplace Blockchain para Comercialização de Energia Elétrica no Ambiente da Geração Distribuída, pag. 214. TOSHIOKA, Frank; ROLIM, Luiz, 2021.

Como mostrado na tabela, sob a perspectiva dos principais nós mantenedores (Os "nós mantenedores" referem-se a indivíduos, organizações ou entidades que mantêm e operam a infraestrutura de uma rede *blockchain*, em sistemas *blockchain*, a rede é descentralizada e distribuída, e a manutenção da rede é realizada por esses nós que executam funções críticas, como validar transações, adicionar blocos à cadeia e garantir a segurança da rede), nas condições hipotéticas do cenário apresentado, o tamanho do mercado poderia chegar a cerca de R\$ 11 milhões anuais em 2030. Considerando que toda a comercialização de energia ocorreria de forma descentralizada e automatizada em ambiente virtual, este montante sinaliza o potencial de sustentabilidade econômica do modelo proposto de *Marketplace*, contemplando unicamente às transações P2P do ativo Energia Elétrica. Assim, a expansão das funcionalidades do *Marketplace* para outros serviços relacionados à energia elétrica, poderia contribuir para um aumento dos resultados econômicos aqui apresentados e para a sustentabilidade econômica do novo mercado.

Em relação ao nó *Marketplace*, é fundamental assegurar a remuneração de forma a que este possa desempenhar as funções de sua responsabilidade dentro de um contexto de sustentabilidade econômica. Dentre elas, a principal é promover a

confiança do mercado nos *E-tokens* (criptomoedas) e estabelecer um lastro financeiro fundamental para a sustentabilidade do modelo para que os participantes utilizem esse criptoativo de forma prática e segura. Neste sentido, a remuneração obtida seria proveniente das taxas cobradas nas transações de energia liquidadas durante a execução dos leilões, as quais são utilizadas para manter a operação do mercado e os sistemas computacionais de apoio.

Dentre os benefícios econômicos atribuídos ao modelo proposto de comercialização de energia, destacam-se a possibilidade de redução do custo de energia elétrica pelos consumidores advinda da autonomia de escolha de compra de uma fonte renovável e a remuneração dos prosumidores em sintonia com um modelo equilibrado e sem distorções de natureza econômica. Em conjunto, esses fatores contribuem para a diversificação do mercado e segurança das transações de energia.

Outro estudo de Xu, Yang e Li (2019) foi estabelecido um modelo de transação de fluxo de informações de grupo de microrrede (um sistema de distribuição de energia elétrica que opera de forma autônoma ou conectada à rede elétrica principal, dependendo das condições específicas.), com base na tecnologia *blockchain*. Segundo os autores, como uma tecnologia emergente de banco de dados distribuído, a tecnologia tem um grande potencial de aplicação no campo da comercialização de energia. Ao analisar as necessidades dos três principais tipos de agentes de mercado, os autores construíram o modelo de transação de fluxo físico do grupo de microrredes. O relacionamento de concorrência e os respectivos objetivos entre os três agentes foram considerados. Os resultados da pesquisa revelam que o modelo garante que não haja fenômeno de alta renda e baixo custo no processo de negociação, portanto, a segurança e a qualidade do mercado são garantidas.

Em um novo modelo que incorporasse os princípios tecnológicos de um *Marketplace* descentralizado em uma Microrrede, as Unidades Consumidoras (UCs) teriam a capacidade de conduzir transações de energia localmente, comprando e/ou vendendo energia entre si, com seus vizinhos prosumidores. Isso se alinha com um dos principais objetivos de uma microrrede, que é atender, em sua maioria, sua própria demanda energética. O comércio *peer-to-peer* (P2P) permitiria que essas transações de energia ocorressem a preços de varejo. Além disso, qualquer excedente de energia gerado poderia ser disponibilizado no mercado atacadista, onde poderia ser adquirido pela distribuidora local ou até mesmo por consumidores que fazem parte do Mercado Livre de Energia.

A implementação de um *Marketplace* descentralizado nas microrredes pode abrir caminho para diversos modelos de comercialização de energia, como os seguintes exemplos:

- Transações de energia entre consumidores e prosumidores pertencentes a uma mesma microrrede, com prioridade dada ao mercado local, independentemente de a microrrede estar conectada ou não à rede de distribuição. Nesse cenário, seria estabelecido um *marketplace* local para cada microrrede.
- Comercialização da energia excedente gerada pelas microrredes e injetada na rede de distribuição por meio de um *Marketplace* global. Esse processo poderia envolver diversos participantes, como empresas comercializadoras de energia, consumidores livres ou especiais, bem como as concessionárias de energia locais. Os preços das ofertas e aquisições de energia poderiam ser baseados nos valores horários do PLD (Preço de Liquidação das Diferenças) publicados pela CCEE (Câmara de Comercialização de Energia Elétrica).

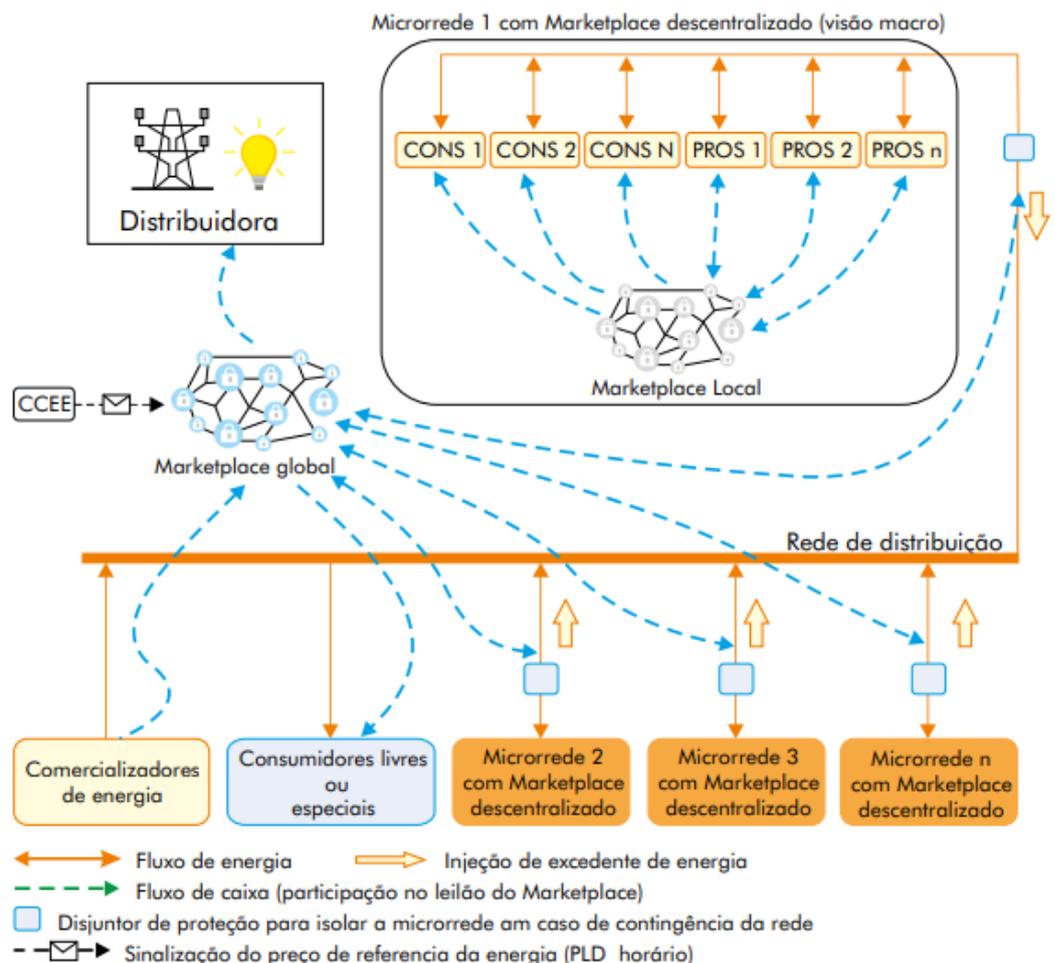


Figura 6: Modelos de operação de Marketplaces descentralizados em Microrredes

Fonte: Marketplace Blockchain para Comercialização de Energia Elétrica no Ambiente da Geração Distribuída, pag 221. TANIGUCHI, Fábio; ROLIM, Luiz; MOREIRA, Aghatta; 201.

A Figura 6 utilizada pelos autores do livro, sintetiza esses modelos de Marketplace descentralizado, onde CONS e PROS representam, respectivamente, os consumidores e prosumidores da microrrede. Nessa figura, observa-se a possibilidade da comercialização interna da energia em cada microrrede, a partir da existência de um *Marketplace* local. Dessa forma, abrem-se possibilidades de comercialização da energia excedente gerada pelas microrredes para a distribuidora local e consumidores livres/especiais em um *Marketplace* global em que o preço de referência de energia seria sinalizado pela CCEE.

Neste contexto, destaca-se a possibilidade de interconexão de microrredes e programas de gerenciamento de carga dos clientes para suporte à infraestrutura de fornecimento de energia como um todo, aumentando assim a confiabilidade, a flexibilidade e a resiliência do sistema. Essas possibilidades carregam consigo vários benefícios, tangíveis e intangíveis, para a rede de fornecimento de energia (Mendes et al., 2018), os quais em conjunto poderão se traduzir em ganhos econômicos para o sistema de distribuição.

A análise de casos de aplicação da tecnologia *blockchain* no setor elétrico tem revelado informações cruciais sobre os desafios enfrentados e as soluções possíveis no mercado de energia. Esses estudos apontam que a *blockchain* oferece uma série de benefícios significativos para os mercados, consumidores e operações dos sistemas de energia. Isso se traduz na criação de novos modelos de negócios, na redução de custos, no aumento da transparência e na segurança aprimorada dos dados, indicando um cenário promissor para o setor de energia.

O cenário de comércio de energia utilizando *blockchain* revela uma perspectiva promissora, conforme evidenciado por pesquisas que apontam para a redução significativa nos custos. A implementação dessa tecnologia inovadora oferece vantagens como a eliminação de intermediários, maior eficiência nas transações e maior transparência. No entanto, apesar do potencial, o setor enfrenta desafios, incluindo questões regulatórias complexas, padronização inconsistente e resistência à adoção generalizada. A superação dessas barreiras é crucial para que o comércio de energia baseado em *blockchain* atinja seu pleno potencial, proporcionando

benefícios econômicos sustentáveis e transformando a dinâmica do mercado de energia.

Nesse contexto, é crucial superar uma série de desafios para garantir o sucesso das implementações, incluindo a necessidade de selecionar a plataforma *blockchain* mais apropriada para o cenário especificado.

Devido à sua natureza relativamente recente, a tecnologia ainda enfrenta obstáculos e restrições quando se trata de sua operação e implementação no setor elétrico. Com base na avaliação das pesquisas realizadas, foram identificados e serão discutidos nesta seção os principais entraves associados.

A natureza descentralizada implica que não existe uma autoridade central para recorrer em caso de problemas, deixando a responsabilidade de gerenciar transações e chaves privadas inteiramente nas mãos dos usuários. Além disso, a segurança das chaves privadas é crítica, pois qualquer perda ou comprometimento resulta na perda irreversível de ativos de criptomoeda. A volatilidade dos preços das criptomoedas torna o investimento arriscado, e os custos de transação variam de acordo com a demanda da rede, podendo ser elevados em momentos de congestionamento. A compreensão da complexa terminologia técnica, como chaves públicas, chaves privadas e consenso, pode ser um desafio para novos usuários. A escolha da carteira adequada dentre os diversos tipos disponíveis é complicada, e a recuperação de chaves perdidas pode ser impossível. A segurança dos ativos digitais em *exchanges* (pontos de compra e venda de energia) depende de terceiros, apresentando riscos. A evolução rápida da tecnologia e a regulamentação em constante mudança em diferentes jurisdições criam incerteza. A limitada aceitação das criptomoedas como forma de pagamento e a presença de golpes e fraudes no mercado desafiam a confiança dos investidores. Por fim, a transparência e pseudonimato das transações podem levantar questões de privacidade e segurança. Esses desafios destacam a necessidade de educação, conscientização e segurança rigorosa para os usuários que buscam se envolver no ecossistema de criptomoedas e *blockchain*.

A comercialização de energia no modelo P2P baseado em *blockchain* tende a impactar as operações cotidianas do sistema de distribuição devido ao aumento da exportação de energia das Ucs (Unidades Consumidoras) para a rede elétrica. Tais impactos podem requisitar reforços e expansões na rede de distribuição, os quais tendem a serem considerados investimentos prudentes, necessários para assegurar a qualidade do serviço a consumidores e prosumidores.

De forma complementar, espera-se que as perdas na rede também diminuam, visto que um maior volume de energia será produzido e consumido nas imediações dos pontos de geração. Neste contexto, destaca-se a possibilidade de interconexão de microrredes e programas de gerenciamento de carga dos clientes para suporte à infraestrutura de fornecimento de energia como um todo, aumentando assim a confiabilidade, a flexibilidade e a resiliência do sistema. Essas possibilidades carregam consigo vários benefícios, tangíveis e intangíveis, para a rede de fornecimento de energia (Mendes et al., 2018), os quais em conjunto poderão se traduzir em ganhos econômicos para o sistema de distribuição.

Observou-se um crescente campo de pesquisa em torno do conceito de controle compartilhado por meio de contratos inteligentes. As áreas para desenvolvimento adicional incluem projeto e implementação de algoritmos de contrato inteligente, bem como métodos e técnicas para integração com *hardware* de controle e medição. Intervenção regulatória será requerida para possibilitar o uso de contratos inteligentes.

A regulamentação precisa ser adaptada antes que os mercados de energia com microrredes possam ser implementados comercialmente. A regulamentação pode atrair novos investidores para o mercado de criptomoedas e *blockchain*, proporcionando segurança jurídica, proteção ao investidor, transparência do mercado, prevenção de atividades criminosas e inclusão financeira. Ela também cria confiança, incentiva o crescimento da indústria e pode facilitar o acesso a mercados tradicionais, embora seja fundamental encontrar um equilíbrio entre a regulamentação e a inovação para garantir um ambiente atrativo e competitivo.

No ano de 2023 entra em vigor no Brasil o Marco Legal das criptomoedas, a nova legislação, recebida com bons olhos pelo setor, complementa as leis que regem o sistema financeiro e abre espaço para uma regulamentação mais detalhada sobre operações com criptoativos. Em decreto publicado no dia 14 de Junho de 2023, pelo presidente em vigor, ficou estabelecido que o Banco Central do Brasil (BC) é a autarquia responsável por regulamentar e monitorar esse mercado envolvendo serviços de ativos virtuais. O novo marco legal inclui no artigo 171 do Código Penal (que trata de estelionato) um trecho específico que torna crime irregularidades envolvendo criptoativos.

Outra dificuldade encontrada é a mão de obra qualificada, como mencionado anteriormente, por se tratar de uma tecnologia nova e em ascensão, uma pesquisa

realizada pela *Cryptum* (empresa que está liderando o caminho para a *Web3.0*) com mais de cem líderes profissionais do setor financeiro no Brasil revelou que as empresas reconhecem o potencial dos avanços proporcionados pela adoção da tecnologia *blockchain*. De acordo com o levantamento, 81% dos entrevistados concordam parcial ou totalmente que é difícil encontrar profissionais qualificados no mercado com expertise em *blockchain*. Além disso, a pesquisa destaca que 59% dos participantes acreditam que as empresas ainda não estão investindo em treinamento para seus profissionais compreenderem plenamente o potencial dessa tecnologia, enquanto apenas 17% afirmam já ter iniciado a preparação nesse sentido. Essas conclusões ressaltam os desafios enfrentados pelas empresas financeiras na adoção da *blockchain* e na formação de equipes capacitadas para explorar seu potencial.

5. Conclusão

Atualmente, o setor elétrico enfrenta novos desafios, principalmente devido à expansão das fontes renováveis nas redes de distribuição. A busca pela modicidade tarifária, presente na legislação brasileira desde 1995, pressiona os agentes a reduzirem custos e garantirem requisitos essenciais no fornecimento de energia. Diante dessas demandas legais e sociais, a adoção de inovações tecnológicas se torna imperativa para o setor elétrico.

O presente estudo abordou a integração da "*Web 3.0*" no setor de energia elétrica, explorando sua aplicação no comércio P2P como alternativa para transações de energia entre indivíduos. *Startups* e empresas ao redor do mundo têm proposto tecnologias P2P, destacando-se o uso da *blockchain*, notável na última década devido ao sucesso das criptomoedas, como o *Bitcoin*.

Os benefícios econômicos do *marketplace* de energia P2P dependem de diversos fatores, como a tipologia e atribuições dos agentes, perfil de demanda. Estratégias de negociação também influenciam o comportamento do mercado, estudos de caso específicos são cruciais, considerando as particularidades de cada ambiente.

Os benefícios incluem a redução do custo de energia para consumidores, autonomia na escolha de fontes renováveis e remuneração equilibrada dos prosumidores. A automação das transações e a dinâmica proporcionada pela adoção de sistemas baseados em *blockchain* apresentam vantagens significativas em

eficiência econômica, operando em ambiente virtual e descentralizado. Os resultados simulados apontam condições favoráveis para a viabilidade econômica do novo mercado, estimulando avanços na cadeia de inovação.

6.Referências

1. ANDONI, M. et al. *Blockchain technology in the energy sector: A systematic review of challenges and opportunities. Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 100, p. 143–174, 2019.
2. BRASIL, 2022. *Lei nº 14.478, de 21 de Dezembro de 2022*. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2022/lei/L14478.htm, Acesso em 28 de Novembro 2023.
3. CCEE.2023, *Câmara de comercialização de energia, Sobre Nós*. Disponível em: <https://www.ccee.org.br/web/guest/sobrenos>; Acesso em 24-09-2023.
4. CHRISTIDIS, K.; DEVETSIKIOTIS, M. *Blockchains and smart contracts for the internet of things. IEEE Access*, v. 4, p. 2292–2303, 2016.
5. CRYPTO.COM, *Crypto Market Sizing*, pag.10. HON, Henry; 2022
6. DICK, Carol Inoue.; PRAKTIKNJO, Aaron. *Blockchain technology and electricity wholesale markets: Expert insights on potentials and challenges for OTC trading in Europe. Energies*, v. 12, n. 5, p. 1-25, 2019.
7. ETHERSCAN, *Transaction Detail*. Disponível em: <https://etherscan.io/tx/0xc9869129c66f39762bcb0b34086e525d15b124421c6968df1d5a19fc0bdd874a>, Acesso em 04 de Novembro de 2023.
8. FERREIRA, J. C.; MARTINS, A. L. *Building a community of users for open market energy. Energies*, v. 11, n. 9, p. 23-30, 2018.
9. FURLUNGER, D., UZUREAU, C. *The real business of blockchain. Harvard Business Review Press*, Kindle Edition 2019.
10. GREWAL-CARR, V.; STEPHEN, M. *Blockchain Enigma. Paradox. Opportunity*. Deloitte, 2016.
11. LAWRENCE, Steven. *Os segredos do blockchain: o guia definitivo de negócios para dominar o blockchain, bitcoin, criptomoedas, mineração e o futuro da internet*. E-book 2019.
12. LIVINGSTON, D. et al. *Applying Block chain Technology to Electric Power Systems.*, 2018.

13. Mendes, G.; Nylund, J.; Annala, S.; Honkapuro, S.; Kilkki, O; Segerstam, J. *Local energy markets: opportunities, benefits, and barriers*, CIRED Workshop, 7-8 June 2018.
14. MACHADO, Solange, et al. *Novo Modelo de Comercialização de Energia Elétrica Utilizando Blockchain, um Estímulo à Geração Distribuída e aos Veículos Elétricos*. VIII Congresso Brasileiro de Energia Solar, Fortaleza, 05 de junho de 2020.
15. MENGELKAMP, Esther et al. *Designing microgrid energy markets*. *Applied Energy*, v. 210, p. 870–880, 2018.
16. MOTTA-ROTH, D.; HENDGES, G. R. *Produção textual na universidade*. São Paulo: Parábola Editorial, 2010.
17. POWERLEDGER LIGHTPAPER, *Power Ledger introduces its multipurpose blockchain*. Agosto de 2023.
18. OECD. *The Tokenisation of Assets and Potential Implications for Financial Markets*, 2020.
19. Strüker, Jens; ALBRECHT, Simon; REICHERT, Stefan. *Blockchain in the Energy Sector*. In: *Business Transformation through Blockchain*. Cham: Springer International Publishing, p. 23–51, 2019.
20. TOSHIOKA, Frank; ROLIM, Luiz. *Marketplace blockchain para comercialização de energia elétrica no ambiente da geração distribuída*. 1. ed. - Rio de Janeiro : Synergia, 2021.
21. VERGARA, Sylvia C. *Projetos e relatórios de pesquisa em administração*. 3.ed.pg 47. Rio de Janeiro: Atlas, 2000.
22. XU, Zixiao; YANG, Dechang; LI, Weilin. *Microgrid group trading model and solving algorithm based on blockchain*. *Energies*, v. 12, n. 7, p. 1-19, 2019.
23. WANG, Z. et al. *Research on the active power coordination control system for wind/photovoltaic/energy storage*. In: IEEE. 2017 IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2), p. 23–51, 2017.