



Ministério da Educação Universidade  
Federal de Ouro Preto Escola de Minas  
Departamento de Engenharia de Produção



## **Aplicabilidade da Tecnologia Blockchain no Setor Elétrico**

VINICIUS ALVES LOURES FRANÇA

Ouro Preto MG  
2025

VINICIUS ALVES LOURES FRANÇA

## **Aplicabilidade da Tecnologia Blockchain no Setor Elétrico**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Produção da Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau em Bacharel em Engenharia de Produção.

**Orientador:** Prof. Dr.<sup>a</sup> Bruna de Fátima Pedrosa Guedes Flausino

Ouro Preto MG  
2025



## FOLHA DE APROVAÇÃO

**Vinicius Alves Loures França**

Aplicabilidade da Tecnologia Blockchain no Setor Elétrico

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Produção da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro de Produção

Aprovada em 07 de julho de 2025

### Membros da banca

DSc. - Bruna de Fátima Pedrosa Guedes Flausino - Orientador(a) (Universidade Federal de Ouro Preto)  
DSc. - Magno Silvério Campos - (Universidade Federal de Ouro Preto)  
DSc. - Cristiano Luis Turbino de Franca e Silva - (Universidade Federal de Ouro Preto)

Bruna de Fátima Pedrosa Guedes Flausino, orientadora do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 07/07/2025.



Documento assinado eletronicamente por **Magno Silverio Campos, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 07/07/2025, às 19:34, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Cristiano Luis Turbino de Franca e Silva, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 07/07/2025, às 19:39, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Bruna de Fatima Pedrosa Guedes Flausino, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 07/07/2025, às 19:47, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [http://sei.ufop.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **0940189** e o código CRC **308924B4**.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço à Universidade Federal de Ouro Preto e ao corpo docente do Curso de Engenharia de Produção pela oportunidade e pelo conhecimento proporcionado ao longo da minha formação. Em especial, expresso minha gratidão a minha orientadora, cuja orientação, apoio e dedicação foram fundamentais para a conclusão deste trabalho.

*Nada é permanente, exceto a mudança – Heráclito.*

## RESUMO

Este estudo analisa as possíveis transformações proporcionadas pela inserção da tecnologia blockchain na administração e no fornecimento de energia elétrica, considerando o crescimento das matrizes de energias limpas, associadas à ampliação do uso de recursos de TIC (Tecnologias da Informação e Comunicação). A blockchain surge como um recurso promissor para tornar o setor elétrico mais descentralizado e acessível, facilitando a interação direta entre consumidores e produtores de energia, com maior segurança e autonomia, além de incentivar iniciativas locais de geração energética sustentável. Sua aplicação permite rastrear a origem da energia em tempo real, garantindo transparência e segurança nas transações mediante registros imutáveis e contratos inteligentes, simplificando processos, reduzindo custos e acelerando a descarbonização. Para alcançar o objetivo geral, o estudo analisa os fundamentos históricos e operacionais do blockchain, examina o uso em distintos cenários (com foco na América e Europa, identificando avanços e desafios), e avalia o cenário nacional. Como exemplo prático, destaca-se o projeto da LO3 Energy, que implementou um modelo de comercialização energética *peer-to-peer* utilizando um sistema blockchain no bairro de Brooklyn, em Nova York, permitindo que vizinhos comprassem e vendessem energia solar entre si de forma automatizada e segura. Entre os aspectos mais relevantes identificados, destaca-se que, apesar de algumas iniciativas, o Brasil ainda não apresente uma regulamentação específica, iniciativas acadêmicas e empresariais já apontam caminhos concretos para a inserção dessa tecnologia no ambiente elétrico nacional.

**Palavras-chave:** Blockchain; Setor Energético; Geração Distribuída; Smart Contracts; Descentralização; Energia Elétrica.

## ABSTRACT

This study analyzes the potential transformations enabled by the integration of blockchain technology into the management and supply of electric power, taking into account the growth of renewable energy sources and the increasing convergence with Information and Communication Technologies (ICTs). Blockchain emerges as a promising tool for making the electricity sector more decentralized and accessible, facilitating direct interaction between energy consumers and producers with greater security and autonomy, while also encouraging local initiatives for sustainable energy generation. Its application allows real-time tracking of the energy's origin, ensuring transparency and security in transactions through immutable records and smart contracts, simplifying processes, reducing costs, and accelerating decarbonization. To achieve the general objective, the study explores the historical and operational foundations of blockchain, examines its use in different contexts (with a focus on the Americas and Europe, identifying progress and challenges), and evaluates the national landscape. As a practical example, the study highlights the LO3 Energy project, which implemented a Peer-to-Peer energy trading model using a blockchain system in the Brooklyn neighborhood of New York City, allowing neighbors to buy and sell solar energy among themselves in an automated and secure manner. Among the key findings, it is noted that although Brazil still lacks specific regulation, academic and business initiatives are already pointing to concrete pathways for integrating this technology into the national electricity sector.

**Keywords:** Blockchain; Energy Sector; Distributed Generation; Smart Contracts; Decentralization; Electrical Energy.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Estrutura de cadeias e blocos.....	12
Figura 2 – Crescimento das publicações contendo o termo "Blockchain" .....	13
Figura 3 – Os 5 componentes chave do blockchain.....	15
Figura 4 – Principais tipos de blockchain seguindo o modelo de permissionamento.....	17
Figura 5 – Exemplificação de compra de energia com o uso do blockchain.....	20

## **LISTA DE QUADROS**

Quadro 1 – Fundamentos da blockchain .....	14
Quadro 2 – Os quatro conceitos fundamentais da blockchain .....	17

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 – Fundamentos da blockchain .....	30
--	----

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
DEPRO	Departamento de Engenharia de Produção
UFOP	Universidade Federal de Ouro Preto
CI	Contrato Inteligente
MIT	<i>Massachusetts Institute of Technology</i>
P2P	<i>Peer-to-peer</i>
PoW	<i>Proof of Work</i>

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>Introdução.....</b>	<b>7</b>
<b>1.1</b>	<b>Objetivos Gerais e Específicos .....</b>	<b>9</b>
<b>1.2</b>	<b>Justificativa.....</b>	<b>9</b>
<b>1.3</b>	<b>Metodologia.....</b>	<b>10</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>12</b>
<b>2.1</b>	<b>Origem e Características do Blockchain.....</b>	<b>12</b>
<b>2.1.1</b>	<b><i>Conceitos fundamentais do blockchain.....</i></b>	<b>17</b>
<b>2.2</b>	<b>Uso do Blockchain no Setor Elétrico.....</b>	<b>18</b>
<b>2.2.1</b>	<b><i>Exemplos Práticos de Aplicação do blockchain no Setor Elétrico .....</i></b>	<b>21</b>
<b>2.3</b>	<b>Setor Elétrico Nacional.....</b>	<b>24</b>
<b>3</b>	<b>IMPACTOS QUE A TECNOLOGIA BLOCKCHAIN PODE OCASIONAR NA GESTÃO E NA DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA .....</b>	<b>27</b>
<b>3.1</b>	<b>A Aplicação da Tecnologia Blockchain no Setor Elétrico Nacional e Internacional.....</b>	<b>28</b>
<b>4</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>33</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>34</b>

## 1 Introdução

A tecnologia blockchain vem ganhando destaque nos anos mais recentes como uma das inovações mais disruptivas da era digital. Desenvolvida inicialmente para dar suporte às transações de criptomoedas, essa ferramenta começou a despertar interesse em múltiplos setores devido à sua capacidade de registrar e validar informações de forma descentralizada, transparente e segura. No âmbito do setor energético, essa tecnologia vem ganhando destaque como uma alternativa promissora como resposta às demandas contemporâneas, entre elas a expansão do consumo mundial, a demanda por matrizes mais sustentáveis e a urgência em assegurar a estabilidade no fornecimento energético dos países. Nesse cenário, a incorporação da tecnologia blockchain aos processos de geração e distribuição energética surge como uma abordagem estratégica para ampliar a eficiência operacional, garantir maior clareza nas transações e incentivar o protagonismo dos usuários finais. Ao possibilitar transações diretas entre produtores e usuários, garantir a rastreabilidade da origem da energia e automatizar processos através de contratos inteligentes, o blockchain se posiciona como uma ferramenta relevante na modernização e digitalização das infraestruturas energéticas.

Acompanhando essa evolução tecnológica, o setor energético tem passado por profundas transformações em resposta à crescente demanda por segurança energética, sustentabilidade e eficiência. Nesse cenário, as Tecnologias da Informação e Comunicação (TIC) têm desempenhado um papel estratégico ao viabilizar soluções inteligentes voltadas ao monitoramento, controle e planejamento equilibrado da oferta e da demanda de energia. A elevação da procura por energia e a demanda de diversificação das matrizes energéticas impulsionaram a adoção de matrizes limpas e sistemas de geração descentralizada, apoiados por ferramentas digitais que tornam esse processo mais estruturado e eficiente. Tecnologias como inteligência artificial, Internet das Coisas (IoT) e sistemas de automação vêm sendo integradas às redes elétricas, promovendo decisões mais rápidas, seguras e baseadas em dados de forma imediata. Além de otimizar a operação do sistema, essas inovações possibilitam a inserção de novas matrizes de energia, favorecendo a descentralização, a flexibilidade e o alinhamento do setor com os compromissos globais de descarbonização. Essas mudanças foram impulsionadas, em grande parte, pela adoção de matrizes renováveis em menor escala, resultando na expansão da geração descentralizada, na ampliação da variedade de serviços oferecidos e o reforço do engajamento dos consumidores no ambiente energético (ANDONI et al., 2019).

Nesse contexto, a tecnologia blockchain emerge como uma das ferramentas fundamentais da revolução digital. Estudiosos de distintos países apontaram grande potencial

dessa inovação no setor energético, com possibilidade de facilitar a descentralização, a modernização digital e a democratização do sistema elétrico, conferindo aos consumidores maior controle com o objetivo de compreender, desenvolver, acompanhar e, produzir seus próprios requisitos energéticos (KHATOON et al., 2019).

A estrutura atual da indústria elétrica apresenta um elevado nível de complexidade, o que demanda a atuação de diversos intermediários, entre eles agentes comerciais, operadores logísticos, instituições financeiras, corretores e órgãos reguladores. (MENGELKAMP et al., 2018). O emprego de soluções blockchain no sistema elétrico viabiliza a negociação sem mediação, permitindo a troca direta de energia entre as partes. Com isso, consumidores e "prossumidores" (aqueles que produzem e consomem energia) podem se conectar com segurança, agilidade e sem centralização. Esse sistema de comércio *Peer-to-Peer* também gera benefícios econômicos e sociais, incentivando o crescimento da geração local de fontes renováveis (MENGELKAMP et al., 2018).

A implementação do blockchain na área energética permite que os consumidores acompanhem de forma imediata, a procedência da energia utilizada, certificando-se de que ela seja proveniente de matrizes renováveis, rastreável, segura e entregue de forma direta, sem a presença de intermediários. Isso é garantido por registros imutáveis e confiáveis, que asseguram visibilidade, clareza e a segurança das transações, permitindo que todas as partes auditem os resultados obtidos (GABRICH; COELHO; COELHO, 2017).

Quando associada aos contratos inteligentes (CI), que são executados automaticamente ao se confirmar o cumprimento das condições acordadas entre as partes, a blockchain elimina intermediários, simplifica processos e reduz custos de forma considerável. Além disso, evita intervenções de terceiros, otimizando a eficiência do sistema (SOUZA; MOREIRA, 2023).

Outro aspecto relevante é o papel do blockchain como uma oportunidade para acelerar o processo de descarbonização, por meio da descentralização e transformação digital do setor energético. Esse recurso oferece rastreabilidade, segurança e rapidez nas transações, contribuindo para um setor mais sustentável (SOUZA; MOREIRA, 2023).

Apesar dessas vantagens, a descentralização do setor energético pode aumentar sua complexidade, exigindo o desenvolvimento de novas tecnologias para gerenciar operações, armazenar eletricidade excedente e superar desafios estruturais. Nesse cenário, a digitalização aparece como uma estratégia para tornar o sistema elétrico mais flexível, tornando o blockchain uma alternativa viável para viabilizar essas mudanças (IBERDROLA, 2019).

Diante desse cenário, acredita-se que a tecnologia em questão representa mais do que uma tendência tecnológica passageira, mas sim um recurso que sinaliza transformação na

lógica tradicional do setor elétrico. Embora existam desafios técnicos, de regulação e estruturais, observa-se um avanço gradual rumo à digitalização e descentralização dos sistemas energéticos. Este estudo parte do entendimento de que, conforme o Brasil progride na liberalização do mercado e amplia a participação de fontes renováveis, a tecnologia blockchain pode assumir um papel estratégico na consolidação de um modelo de gestão energética mais eficiente, transparente e participativo.

Além de analisar possibilidades, este estudo busca compreender como essa tecnologia pode ser integrada de maneira realista ao contexto brasileiro, considerando tanto as experiências internacionais quanto os desafios específicos da nossa estrutura energética.

### **1.1 Objetivos Gerais e Específicos**

O presente estudo tem como objetivo geral investigar os possíveis impactos que a tecnologia blockchain pode ocasionar na gestão e na distribuição de energia elétrica.

Para desenvolver o objetivo do estudo, será necessário delinear os objetivos específicos como:

- Analisar as origens da tecnologia blockchain, descrevendo as suas principais características e delimitando o seu mecanismo de funcionamento.
- Apresentar a realidade do setor elétrico de nações que já aplicam a tecnologia, procurando identificar os avanços e desafios.
- Verificar de que forma o setor elétrico brasileiro pode se beneficiar da aplicação da tecnologia blockchain, analisando os desafios e as oportunidades para sua inserção e utilização mais ampla nos próximos anos

### **1.2 Justificativa**

A transformação digital está redefinindo inúmeras indústrias e, nesse novo cenário, o setor energético também demonstra necessidade de se redefinir através da promissora tecnologia blockchain, por meio de transações mais seguras, transparentes e descentralizadas. Assim, justifica-se a sua aplicação no setor energético devido a crescente necessidade de sistemas mais eficientes, resilientes e sustentáveis. Entretanto, não há uma quantidade expressiva de dados na literatura referente a aplicação prática do blockchain no setor energético. (NETO, 2023).

Diante desse cenário, o presente trabalho tem como objetivo contribuir com a discussão sobre as possibilidades de aplicação da tecnologia blockchain no setor energético, explorando seus potenciais benefícios e desafios. A partir de uma análise de experiências nacionais e internacionais, busca-se oferecer uma visão geral que auxilie na compreensão das oportunidades de modernização das redes elétricas por meio dessa tecnologia, com foco em aspectos como eficiência, segurança e sustentabilidade.

A escolha do tema também se alinha diretamente à formação em Engenharia de

Produção, que envolve a otimização de processos, a utilização de tecnologias inovadoras e a busca contínua por eficiência e sustentabilidade nos sistemas produtivos. A aplicação da blockchain no setor energético representa uma oportunidade de repensar modelos tradicionais voltados à administração de recursos, favorecendo o desenvolvimento de sistemas mais inteligentes, ágeis e economicamente viáveis princípios centrais da engenharia de produção moderna. Além disso, o interesse pessoal do autor pela transformação digital, inovação tecnológica e soluções sustentáveis reforça o compromisso em investigar como novas ferramentas podem impactar positivamente setores estratégicos, como o energético, que é vital para o avanço econômico e do bem-estar social. Assim, este estudo reflete tanto a formação acadêmica quanto os interesses profissionais em promover avanços tecnológicos alinhados à eficiência e responsabilidade socioambiental.

### **1.3 Metodologia**

A implantação da tecnologia blockchain no setor energético vem sendo discutida como uma potencial revolução na forma de produção, comercialização e consumo de energia. No entanto, seu desenvolvimento enfrenta uma série de desafios técnicos, regulatórios e econômicos que precisam ser superados para que suas vantagens sejam plenamente aproveitadas. Este estudo propõe uma avaliação crítica da tecnologia, explorando seus principais entraves, e as oportunidades que ela oferece para uma matriz energética mais descentralizada, segura e eficiente. Para enriquecer a análise, serão apresentados exemplos internacionais, pesquisas em andamento no Brasil e possíveis soluções para a superação dos desafios, proporcionando uma visão mais completa sobre o futuro da blockchain no setor elétrico.

Este trabalho adota uma abordagem qualitativa, baseada em pesquisa bibliográfica e documental, com o objetivo de analisar as potencialidades, aplicações e desafios da tecnologia blockchain no setor elétrico. A opção pela abordagem qualitativa se justifica pela natureza exploratória do tema, que ainda se encontra em desenvolvimento tanto no Brasil quanto em diversas nações, exigindo uma análise interpretativa e contextualizada dos dados disponíveis.

O estudo foi estruturado a partir de um levantamento teórico-conceitual sobre o blockchain, buscando compreender sua origem, funcionamento e características centrais. Em paralelo, foram coletadas informações sobre o setor elétrico, especialmente a estrutura do setor elétrico nacional, os mecanismos de comercialização existentes e os obstáculos associados à transição energética, descentralização e digitalização. Para isso, foram consultadas fontes primárias e secundárias, como artigos científicos, relatórios técnicos, teses, dissertações, repositórios acadêmicos e sites institucionais.

As informações foram extraídas de portais como o da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), da Empresa de Pesquisa Energética (EPE), do Ministério de Minas e Energia (MME), além de associações setoriais, como a ABRACEEL. Também foram utilizados bancos

de dados como o Scielo, Google Scholar e os repositórios digitais da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI) e Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), entre outros. Essa etapa permitiu reunir informações atualizadas e diversas interpretações sobre a aplicação do blockchain no setor energético.

Além da realidade nacional, foram estudadas experiências internacionais de aplicação da tecnologia no setor elétrico, com destaque para países como Alemanha, Estados Unidos, Japão e Reino Unido, que já implementam soluções ou desenvolvem projetos-piloto com o uso do blockchain. A análise dessas experiências serviu de base para entender os caminhos possíveis e os entraves enfrentados em diferentes contextos econômicos, regulatórios e tecnológicos.

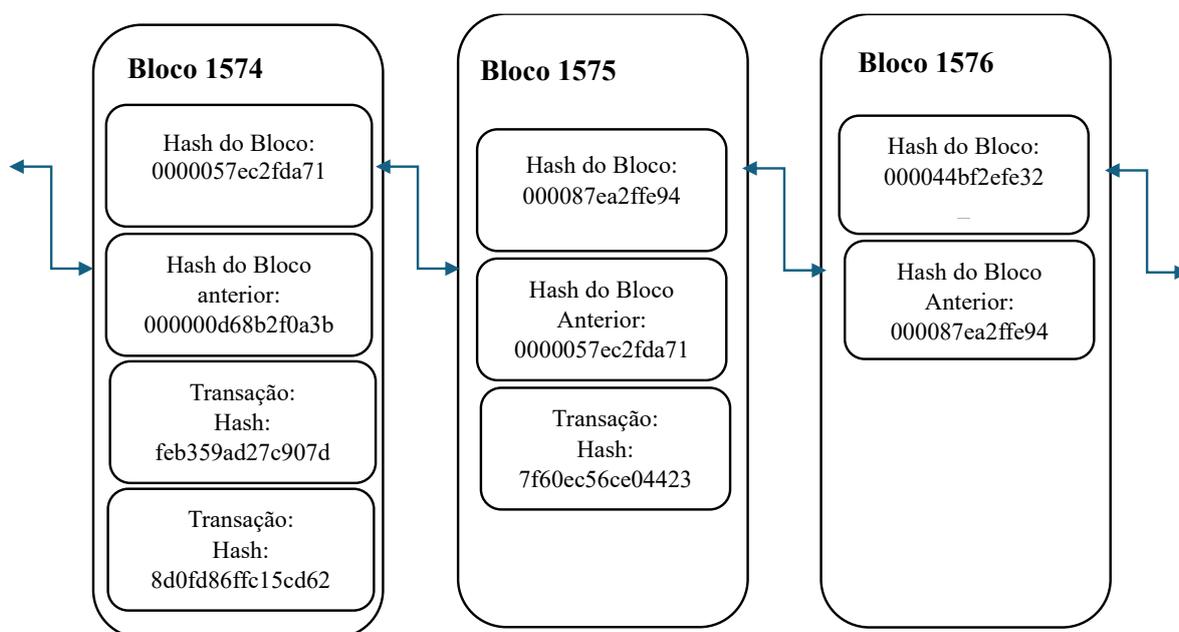
A pesquisa foi desenvolvida seguindo uma sequência que incluiu a definição do tema e dos objetivos, a revisão bibliográfica sobre blockchain e o setor elétrico, a análise de casos internacionais e a organização dos dados coletados conforme os objetivos estabelecidos. Essa abordagem possibilitou identificar alinhamentos relevantes entre o progresso tecnológico e as demandas por modernização do setor elétrico. Além disso, contribuiu para a formulação de uma análise crítica e embasada acerca do papel estratégico do blockchain na busca por maior eficiência, segurança e sustentabilidade no uso da energia. Por fim, com base no caminho metodológico adotado, o estudo avança para a análise dos achados e a proposição de cenários futuros, fundamentados em dados oficiais e nas tendências evidenciadas por estudos técnicos atualizados.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Origem e Características do blockchain

Conforme apontado pela Universidade de Oxford, o blockchain pode ser definido como um tipo de registro distribuído que sustenta a tecnologia do Bitcoin. Sua principal característica é organizar e agrupar transações em blocos que, por sua vez, estão ligados aos blocos anteriores por funções hash criptográficas. O bloco, por sua vez, é ligado juntamente com o anterior através da função hash criptográfico que sofre variação de extensão e tamanho e, ao final, se converte em uma extensão fixa (NATARAJAN; KRAUSE; GRADSTEIN, 2017). Essa estrutura é ilustrada na Figura 1.

Figura 1 – Estrutura de cadeias e blocos



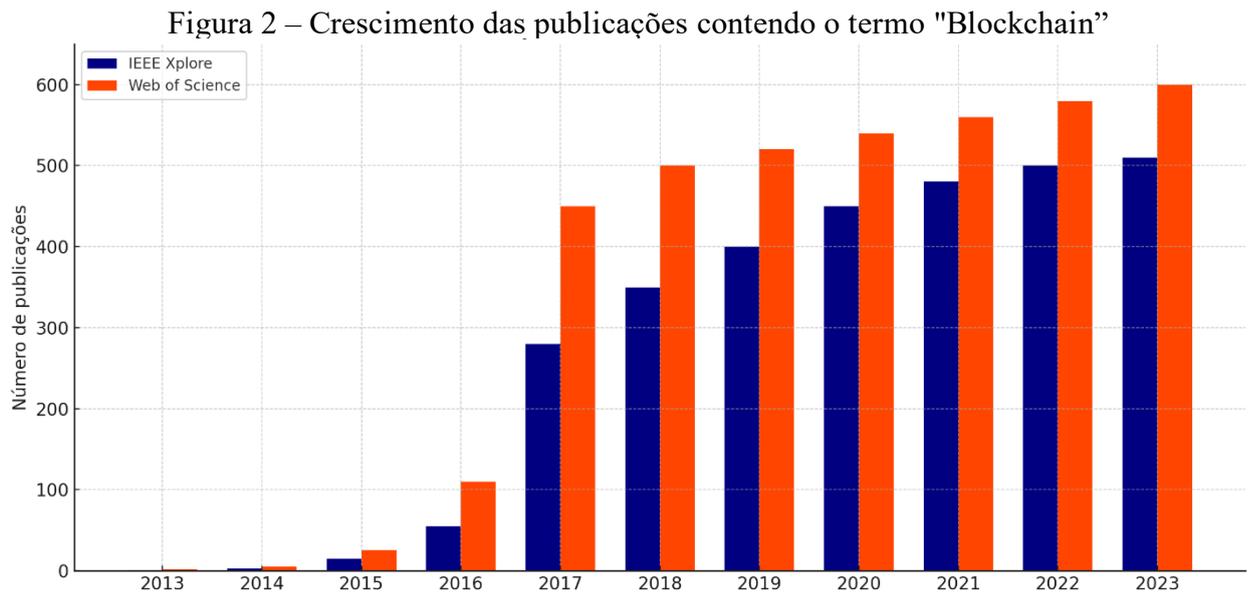
Fonte: HESSE, 2018 – traduzido pelo autor.

O blockchain pode ser comparado a um livro contábil digital e compartilhado que armazena informações em contêineres chamados blocos. Esses blocos se conectam cronologicamente para formar uma cadeia, tornando impossível alterar as transações após serem verificadas e registradas. Cada participante da rede mantém uma cópia atualizada do livro-razão, denominado blockchain, tornando praticamente inviável adulterar todas as cópias globalmente para falsificar uma transação (CHEN, 2018).

Sendo criado em 2009, o blockchain foi projetado para dar suporte à moeda digital Bitcoin, especialmente para pagamentos digitais. Suas características distintivas incluem segurança criptográfica rigorosa e integridade de dados, dispensando a atuação de um agente regulador

central. Como banco de dados distribuído, público e online, ele pode ser acessado por qualquer nó participante da rede, onde o consenso é garantido por algoritmos específicos (FERREIRA; PINTO; SANTOS, 2017).

Sendo dita como uma das tecnologias mais promissoras dos últimos anos, o blockchain foi classificado pelo Massachusetts Institute of Technology (MIT) como uma Tecnologia de Propósito Geral, comparável a invenções como a eletricidade e a telefonia (QUEIROZ; WAMBA, 2019). Esse reconhecimento reflete o aumento expressivo nas publicações científicas contendo o termo "Blockchain" (HESSE, 2018), conforme representado na Figura 2.



Fonte: Adaptado de HESSE, 2018.

O avanço da criptografia e da segurança computacional possibilitou o desenvolvimento de conceitos que deram origem ao sistema blockchain digital, usado para transações em rede que conectam diversos participantes. Conforme disposto no Quadro 1, destacam-se os elementos conceituais essenciais (QUEIROZ; WAMBA, 2019).

Quadro 1 – Fundamentos da Blockchain

<b>Característica</b>	<b>Descrição</b>
Estrutura de Dados em Blocos	Estrutura composta por uma série de registros (blocos) interligados de forma cronológica e criptografada e, ao ser completado, interliga a cadeia de blocos existente de forma permanente e inalterável.
Descentralização	Não há um ponto central de controle ou falha, aumentando a resistência da rede contra ataques e corrupções, em que cada participante tem uma cópia do blockchain constantemente sincronizada e atualizada.
Consenso	Permite que haja um acordo geral sobre o estado atual do livro-razão digital através do Proof-of-Work (PoW) e Proof-of-Stake (PoS) que asseguram que as cópias da blockchain sejam consistentes e adicionadas apenas transações válidas aos blocos.
Imutabilidade	Após o registro das transações na blockchain não há a possibilidade de alteração ou exclusão através das funções hash que ao tentar alterar uma transação seria necessário minerar novamente todos os blocos subsequentes, sendo inviável em redes grandes.
Transparência	Permite que qualquer pessoa na rede visualize as transações concluídas, proporcionando alto nível de transparência e auditoria das transações independentes e quase em tempo real.
Segurança	A criptografia, descentralização e consenso torna a blockchain muito segura contra fraudes e ataques cibernéticos, no qual há a proteção da identidade dos usuários para que realizem transações seguras sem expor informações sensíveis.
Programabilidade	Suportam contratos inteligentes com programas autoexecutáveis que operam em condições definidas para executar automaticamente acordos e tarefas ao predefinir os critérios pré-estabelecidos.

Fonte: ANDONI et al., 2019.

Com o avanço de tecnologias emergentes digitais e a busca por sistemas mais descentralizados, surgiu a necessidade de criar formas de transação que dispensassem intermediários tradicionais, como bancos e instituições financeiras. Nesse contexto, o blockchain despontou como uma estrutura de registro distribuído, capaz de garantir segurança, transparência e imutabilidade das informações. Essa base tecnológica foi responsável por viabilizar o surgimento das criptomoedas, ativos digitais que operam de forma autônoma e descentralizada, permitindo a realização de transações financeiras diretas entre os usuários. Assim, o blockchain passou a ser amplamente associado às criptomoedas, como o Bitcoin, sendo reconhecido como o alicerce tecnológico que sustenta a confiança e a operacionalidade dessas novas formas de valor digital (REVOREDO, 2018).

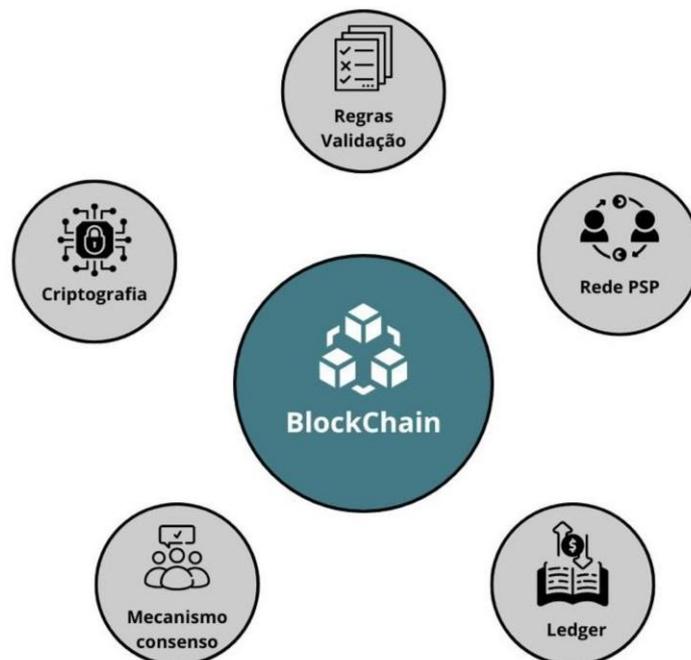
O interesse crescente por criptomoedas, como forma de realizar transações financeiras sem intermediários, impulsionou a expansão da arquitetura blockchain. Essa tecnologia permite que indivíduos desconhecidos realizem transações entre si, superando barreiras de confiança. Apesar das dificuldades iniciais na adoção, o blockchain começou a influenciar setores industriais,

econômicos e de mercado, prometendo descentralizar processos e eliminar entidades de controle centralizado (REVOREDO, 2018).

Os processos fundamentais do blockchain podem ser classificados em cinco estágios principais:

(1) a transação é iniciada pelo usuário em sua carteira digital; (2) a solicitação é transmitida para todos os nós da rede *Peer-to-Peer* (P2P); (3) cada computador valida a transação através do algoritmo Proof-of-Work (PoW); (4) ocorre a resolução de um problema matemático, no qual o nó que resolve mais rapidamente é recompensado com bitcoins; e (5) a transação é aprovada e registrada como um novo bloco na cadeia (PIMAZZONI, 2021).

Figura 3 – Os 5 componentes chave do Blockchain



Fonte: HILEMAN; RAUCHS, 2017.

Conforme representado na Figura 3, destacam-se os componentes fundamentais da tecnologia blockchain. Dentre esses papéis, pode-se citar que a criptografia apresenta a função matemática denominada de hash para comparar diferentes entradas de dados e determinar se os dois objetos são iguais (HILEMAN; RAUCHS, 2017).

Quanto ao algoritmo, ele estabelece o mecanismo operacional que define a ordem das transações realizadas na rede. O ledger, por sua vez, é o registro que contém todas as transações efetuadas, com os blocos interligados de forma sequencial. Esse ledger segue regras de validação que garantem a autenticidade e a validade das transações (HILEMAN; RAUCHS, 2017).

Atualmente, existem diversos modelos de blockchain disponíveis no mercado (Figura 4), diferenciados principalmente pelo modelo de permissionamento, podendo ser aberto ou fechado. Essa distinção baseia-se na segurança e no tipo de ameaças enfrentadas. Os blockchain s abertos operam em ambientes mais desafiadores, onde atores desconhecidos participam

utilizando conceitos da economia cripto. Esse modelo combina teoria dos jogos e design de incentivos econômicos com criptografia de sistemas (PIMAZZONI, 2021).

Já nos blockchain privados, não requerem incentivos econômicos ou utilização de tokens, já que os participantes já se conhecem e são convidados a ingressar na rede ou podem ser vetados. A confiança é estabelecida por meio de contratos formais entre as partes envolvidas (PIMAZZONI, 2021).

Figura 4 – Principais tipos de Blockchain seguindo o modelo de permissionamento

			Leitura	Escrita	Registro	Exemplo
Tipos de Blockchain	Aberto	Público sem permissão	Aberto a todos	Todos	Todos	Bitcoin, Ethereum
		Público permissionado	Aberto a todos	Participantes autorizados	Todos ou uma parcela de participantes autorizados	Sovrin
	Fechado	Consórcio	Restrito a um conjunto autorizado de participantes	Participantes autorizados	Todos ou uma parcela de participantes autorizados	Múltiplos bancos operando em um ledger compartilhado
		Privado com permissão ('empresa')	Totalmente privado ou restrito a um conjunto limitado de nós autorizados	Somente operador de rede	Somente operador de rede	Ledger de banco interno compartilhado entre empresa e subsidiárias

Fonte: HILEMAN; RAUCHS, 2017.

Dentro das principais plataformas de blockchain no segmento público, destacam-se o Bitcoin e o Ethereum. O Bitcoin foi a primeira criptomoeda, servindo de base para o desenvolvimento de outras plataformas e moedas digitais. Já o Ethereum, além de ser uma criptomoeda, introduziu contratos inteligentes, ampliando as funcionalidades do blockchain (PIMAZZONI, 2021).

No segmento privado, destacam-se plataformas como o Corda e o Hyperledger. O Corda, desenvolvido inicialmente pela R3, é amplamente utilizado por instituições financeiras devido à sua ênfase em segurança e privacidade dos dados. De maneira similar, o Hyperledger, liderado pela Linux Foundation com contribuições relevantes da IBM, permite a participação apenas de membros convidados na rede, garantindo um ambiente controlado e seguro (PIMAZZONI, 2021).

O Quorum destaca-se das demais plataformas de blockchain por sua aplicação específica no mercado financeiro. Desenvolvido originalmente pela J.P. Morgan, o Quorum utiliza um algoritmo de consenso adaptado e é uma plataforma de código aberto que atrai o setor financeiro por suas características de segurança e privacidade aprimoradas, sem comprometer o desempenho. Além disso, permite que as instituições personalizem a plataforma conforme suas necessidades específicas (HILEMAN; RAUCHS, 2017).

### 2.1.1 Conceitos fundamentais do blockchain

Para entender o verdadeiro potencial de negócios do blockchain, é essencial conhecer os quatro conceitos fundamentais: registro distribuído, permissões, contratos inteligentes e consenso (HESSE, 2018), conforme apresentado no quadro 2.

Quadro 2 – Os quatro conceitos fundamentais da blockchain

<b>Conceito</b>	<b>Descrição</b>
Registro distribuído	Ao invés de centralizar registros, bancos de dados e armazenamentos de informações, a tecnologia de registro distribuído permite que todos os usuários tenham acesso ao mesmo registro, tornando-o imutável e sincronizado entre todos os participantes.
Permissões	Utilizando métodos criptográficos, é possível implementar mecanismos que restringem a visualização de informações a determinados usuários, garantindo a privacidade e a segurança dos dados armazenados na rede.
Contratos Inteligentes	Além de registrar transações, os contratos inteligentes permitem a criação de acordos automatizados entre as partes, onde condições e termos predefinidos são executados automaticamente. Diferentemente das criptomoedas, possuem caráter não fungível, sendo cada contrato único.
Consenso	Pilar fundamental do blockchain, o consenso permite que o sistema valide transações de forma confiável, mesmo em ambientes onde os participantes não se conhecem, assegurando a integridade e a veracidade das informações registradas.

Fonte: HESSE, 2018.

Essa tecnologia trouxe inúmeros avanços tecnológicos e facilitou diversos processos com a popularização das criptomoedas. O blockchain experimentou um crescimento muito rápido devido às suas múltiplas utilidades, podendo ser aplicado nas esferas social, industrial ou financeira (HILEMAN; RAUCHS, 2017).

## 2.2 Uso do Blockchain no Setor Elétrico

O desenvolvimento de ferramentas digitais e práticas inovadoras um crescente interesse dos consumidores pela eficiência energética. Nesse contexto, surgem alternativas para promover a transição energética visando à diminuição das emissões de carbono. Recentemente, a tecnologia blockchain ganhou ampla popularidade visando à transformação do setor de energia mais sustentável, transparente e seguro, especialmente impulsionada pelo aumento na adoção de criptomoedas (BARTHOLOMEU; PÉRAZ; CAIXETA-FILHO, 2016).

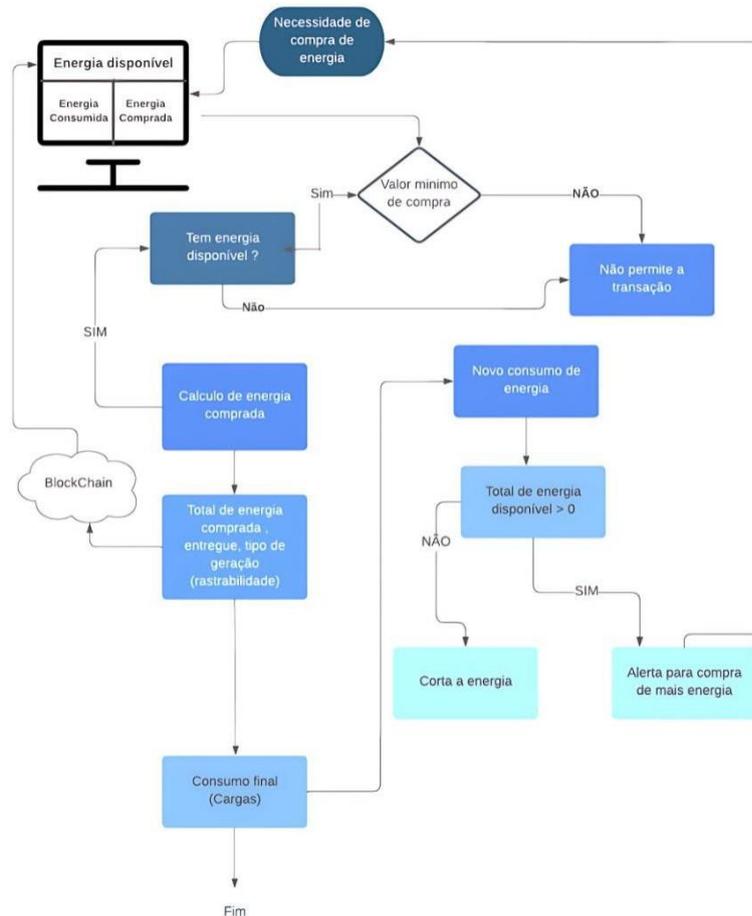
Considerando esse panorama, a aplicação do blockchain no campo da energia é apontado como uma possibilidade promissora para a gestão de transações de energia, oferecendo potencial para um controle mais abrangente sobre o fornecimento e a comercialização de eletricidade. Em propostas de aplicação, sugere-se que tanto na venda quanto na compra de energia, os blocos poderiam ser estruturados para detalhar informações como dados dos geradores, das cargas, da energia fornecida, da duração das transações, da demanda, das perdas e dos serviços auxiliares envolvidos (SOUZA; MOREIRA, 2023).

O banco de dados contratado contempla campos como o endereço do fornecedor de energia, o preço por kWh, a quantidade total de energia adquirida, o consumo total de energia e a energia disponível. Adicionalmente, uma variável booleana é utilizada para indicar se o saldo está positivo, o que possibilita a compra de energia (MARQUES, 2019).

Em contratos nos quais todos os envolvidos possuem acesso a informações específicas e aos termos com suas respectivas regras, a aplicação do blockchain permite que a energia seja pré-paga. Isso implica que os consumidores interessados em comprar energia têm a possibilidade de consultar o preço por kWh no momento da aquisição e escolher a quantidade desejada. Assim, torna-se viável ajustar a curva de consumo conforme os períodos que apresentam o melhor custo-benefício para o usuário (SOARES, 2021).

Para utilizar essa funcionalidade, os consumidores podem acessar uma interface web que exhibe as informações do contrato instantaneamente e lê os valores diretamente do blockchain do medidor de energia ou de plataformas similares (PAULA, 2019). A Figura 5 ilustra o emprego da blockchain no contexto energético.

Figura 5 – Exemplificação de compra de energia com o uso do Blockchain



Fonte: MARQUES, 2019.

Apesar do crescente interesse, a aplicação do blockchain no setor elétrico ainda se concentra, em grande parte, em abordagens teóricas, com utilização limitada em soluções voltadas à eficiência energética no mercado. Dentro desse cenário, as empresas do tipo Energy Services Company (ESCOs) assumem um papel relevante, atuando de forma especializada na oferta de serviços voltados à conservação de energia, contribuindo para otimizar o uso energético e reduzir o consumo de água nas instalações de seus contratantes (BARTHOLOMEU; PéRAZ; CAIXETA-FILHO, 2016).

As ESCOs têm investigado o uso potencial do blockchain como ferramenta para simplificar a gestão dos contratos de desempenho energético. Essa tecnologia pode contribuir para tornar mais eficiente o acompanhamento das economias obtidas por meio de ações voltadas à eficiência, possibilitando que a remuneração dessas empresas estejam diretamente vinculada aos resultados alcançados com suas intervenções. (BARTHOLOMEU; PéRAZ; CAIXETA-FILHO, 2016).

Um dos principais desafios associados ao modelo de contratos do tipo Engineering, Procurement and Construction (EPC) está na necessidade de integrar diferentes etapas como

construção, comissionamento, aquisição e instalação de equipamentos em um único acordo contratual. Essa estrutura permite atrelar parte dos ganhos obtidos com ações de eficiência energética ao pagamento do projeto. No contrato EPC, o executor assume a responsabilidade total pela realização do empreendimento, abrangendo desde o desenvolvimento dos projetos arquitetônicos e de engenharia até o detalhamento dos sistemas de montagem e a oferta dos serviços essenciais à concretização do escopo contratado. (KHATOON et al., 2019).

A utilização de contratos inteligentes (CI) reduz expressivamente os custos de transação e promove economias no setor elétrico, permitindo que as ESCOs assumam projetos menores. Tal situação se deve ao elevado tempo demandado e aos custos envolvidos no desenvolvimento e no gerenciamento de cada contrato EPC são diminuídos, facilitando a rastreabilidade e a mensuração dos resultados. Dessa forma, é possível que haja um crescimento no volume de iniciativas conduzidas pelas ESCOs, visando atingir a quantidade total de economia de energia esperada (GURCAN, 2018).

Especificamente, o blockchain assegura a imutabilidade dos dados por meio de criptografia, tornando-os altamente replicáveis através de protocolos de consenso distribuído e armazenados sem a necessidade de intermediários. Dessa forma, o blockchain fornece o nível de confiança necessário entre o cliente e a empresa que propõe ações de eficiência energética para a avaliação dos contratos de desempenho energético (CAPELO, 2011).

### ***2.2.1 Exemplos Práticos de Aplicação do Blockchain no Setor Elétrico***

Sendo uma tecnologia relativamente nova, a blockchain ainda enfrenta desafios e limitações quanto à sua estrutura operacional e à forma como é empregada na área de energia. A partir da análise de diversos estudos, foram identificados os principais entraves dessa tecnologia, que serão abordados a seguir (ROVERSI et al., 2020).

Um dos desafios mais citados na literatura refere-se à falta de instrumentos regulatórios adequados. Para que a blockchain possa ser plenamente implementada no mercado de energia, as regulamentações vigentes precisam ser adaptadas, garantindo que a legislação acompanhe o progresso das novas tecnologias e suas aplicações no setor (WU; TRAN, 2018). Na Alemanha, a utilização da aplicação da blockchain no setor elétrico avançou com o apoio de programas regulatórios como o "Sonderprojekt Blockchain", que busca adaptar regras para facilitar transações *Peer-to-Peer* de energia renovável.

Segundo a pesquisa conduzida por Dorri e colaboradores (DORRI et al., 2019), há três obstáculos significativos à incorporação da blockchain ao segmento energético, sendo o principal deles o alto custo de investimento. Esse custo se torna ainda mais relevante quando analisados aspectos como infraestrutura computacional, viabilidade financeira e privacidade das transações. Isso ocorre porque, em muitas aplicações, as transações de consumidores e prosumidores podem ser facilmente acessíveis a todos os participantes da rede, comprometendo a confidencialidade dos dados.

Outro fator limitante, apontado por Brilliantova e Thurner (BRILLIANTOVA; THUR-

NER, 2019) e corroborado por Khatoon e colaboradores (KHATOON et al., 2019), refere-se ao alto gasto energético associado ao uso do blockchain. Além de aumentar significativamente os custos operacionais, esse fator também impõe desafios técnicos, como a necessidade de garantir escalabilidade e velocidade adequadas para o funcionamento eficiente no setor energético (SILVESTRE, 2020).

No Brasil, apesar de iniciativas ainda incipientes, algumas pesquisas e projetos-piloto vêm explorando a incorporação do blockchain ao mercado de energia descentralizada. Um exemplo é o projeto da CPFL Energia, que, em parceria com a Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) e a Fundação de Ensino e Engenharia de Santa Catarina (FEESC), realizou um estudo técnico-científico sobre a aplicação da blockchain no setor elétrico, com investimento superior a R\$ 330 mil (PORTAL DO BITCOIN, 2020). Além disso, a CPFL lançou o programa "CPFL Inova", em parceria com a Endeavor, para acelerar *startups* que desenvolvem soluções inovadoras para o setor elétrico, incluindo o uso de blockchain (CANAL ENERGIA, 2022). Embora haja avanços, ainda persiste a carência de normativas claras e os elevados custos envolvidos na implementação continuam sendo obstáculos significativos para a ampla difusão dessa tecnologia no país.

Por fim, os altos custos associados ao armazenamento de dados e os elevados requisitos de hardware para processamento representam mais um obstáculo para a implementação da blockchain no setor. A limitada eficiência na transmissão de transações, sobretudo em aplicações que envolvem diversos usuários, dificulta a expansão do uso em larga escala (POP et al., 2019).

A tecnologia em questão apresenta diversas oportunidades no setor energético, destacando-se pela descentralização do mercado, maior segurança e transparência dos processos, empoderamento dos consumidores e redução de custos operacionais, tornando-se um elemento promissor para o futuro do setor (ROVERSI et al., 2020).

Entre essas oportunidades, a diminuição de custos é uma das mais relevantes, sendo amplamente discutida na literatura como um dos principais benefícios da implementação da blockchain no setor elétrico (DICK; PRAKTINKJO, 2019) (MYLREA; GOURISETTI, 2017), iniciativas como a *Power Ledger* na Austrália demonstram ganhos expressivos para pequenos produtores de energia solar.

Além da redução dos custos de transações, essa tecnologia permite diminuir o tempo de liquidação, eliminar intermediários por meio de modelos de consenso e aumentar a lucratividade ao otimizar os custos dos participantes que utilizam inteligência de mercado sofisticada (WANG et al., 2019).

No Japão, a *Tokyo Electric Power Company Holdings (TEPCO)* tem explorado a aplicação da tecnologia blockchain como ferramenta para otimizar a gestão de microgrids e promover a descentralização do sistema energético. Em 2017, a empresa anunciou sua participação na *Energy Web Foundation*, uma iniciativa global que visa acelerar a

implementação comercial de soluções baseadas em blockchain no setor de energia (TOKYO ELECTRIC POWER COMPANY HOLDINGS, INC., 2017).

No Brasil, a Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) conduziu um estudo que implementou uma rede blockchain *privada* utilizando a plataforma *Hyperledger Besu*, com o objetivo de integrar dispositivos industriais por meio de contratos inteligentes. A pesquisa demonstrou a viabilidade do uso do blockchain como meio de assegurar a integridade e a segurança na comunicação de dados em ambientes industriais (NUNES, 2021).

A segurança e a confiabilidade da blockchain são garantidas por seus algoritmos criptográficos e mecanismos de consenso, tornando possível a implementação de um comércio de energia descentralizado. Em comparação com as plataformas centralizadas tradicionais, esse modelo oferece um nível mais elevado de privacidade e segurança nas transações (O'DONOVAN; O'SULLIVAN, 2019).

Além dos benefícios econômicos e de segurança, a blockchain pode ter um impacto expressivo na elaboração de novas normas e estímulos de mercado, influenciando diretamente modelos de negócios corporativos. A tecnologia também tem sido amplamente discutida em seu papel na "Internet das Coisas", onde proporciona transparência e viabiliza mercados distribuídos promissores (AHL et al., 2019).

A aplicação da blockchain no setor energético pode beneficiar consumidores e prosumidores, permitindo maior autonomia na comercialização de energia, eliminando intermediários e aumentando a transparência das operações. Com isso, agentes de menor porte na geração energética passam ter mais controle sobre a distribuição e a venda da eletricidade gerada (ANDONI et al., 2019).

Outro aspecto relevante é o potencial da blockchain para integrar-se a sistemas inteligentes de gerenciamento de energia, tornando-os mais resilientes a ataques cibernéticos no futuro. Por meio da rede blockchain, é possível armazenar e compartilhar dados energéticos com segurança, garantindo maior transparência e confiabilidade na gestão das informações (KIM et al., 2019).

A confiança proporcionada pela blockchain também viabiliza a automação de contratos inteligentes, permitindo que transações multipartidárias ocorram de maneira eficiente, seguindo acordos previamente estabelecidos entre produtores e usuários de energia descentralizada. Esse modelo facilita as transações, reduz custos, melhora a segurança e contribui para uma integração mais sustentável das fontes descentralizadas de geração de energia. Adicionalmente, a descentralização proporcionada pela blockchain melhora a eficiência da rede elétrica, otimizando a gestão das informações e a documentação da energia residual, o que fortalece a fidelidade e o controle de dados por parte das concessionárias (MYLREA; GOURISETTI, 2017).

Estudos sobre a compatibilidade da blockchain com a Internet da Energia indicam que essa tecnologia tem grande potencial, porque permite implementar confiança entre os nós da rede sem depender de uma autoridade central. O processo de atualização dos dados ocorre por

meio de um algoritmo de consenso distribuído, garantindo transparência e proteção à privacidade. Além disso, os algoritmos criptográficos reforçam a segurança das informações, tornando a realização de transações de forma mais eficiente e reduzindo custos operacionais (WU; TRAN, 2018).

A introdução da tecnologia blockchain no setor elétrico tende a promover transformações, particularmente em relação à desintermediação das relações entre geradores e consumidores de energia. Essa abordagem possibilita a criação de um modelo de negociação direta entre os agentes da rede, reduzindo a dependência de concessionárias, distribuidores e operadores do mercado atacadista. Com isso, torna-se viável otimizar o consumo energético e diminuir os custos ao consumidor final. Estimativas indicam que a atuação de intermediários pode elevar o preço da eletricidade em até 20%, o que evidencia o potencial da blockchain em promover ganhos de eficiência econômica no setor (BRILLIANTOVA; THURNER, 2019).

### **2.3 Setor Elétrico Nacional**

O modelo atual do setor elétrico brasileiro foi proposto pelo governo em 2003 e aprovado pela Assembleia Nacional por meio da Lei nº 10.848, de 15 de março de 2004, que dispõe sobre a comercialização de energia elétrica no país. Tradicionalmente caracterizado pela predominância da geração hidrelétrica, o setor tem experimentado mudanças significativas ao longo dos últimos anos. Conforme apontado por com o Balanço Energético Nacional 2024, com ano-base 2023, a fonte hidráulica representa 58,9% da geração elétrica, seguida pela eólica (13,2%) e solar (7,0%) (EPE, 2024). Esse cenário evidencia a transição para um sistema hidrotermicoeólico, que combina diversas fontes renováveis e térmicas para garantir o suprimento energético.

O avanço da geração descentralizada, com destaque para a energia solar fotovoltaica, tem desempenhado papel importante na diversificação e pulverização da matriz energética brasileira. Contudo, a expansão das fontes renováveis intermitentes, como a solar e a eólica, impõe o desafio de garantir maior adaptabilidade e atualização dos mecanismos de operação do sistema elétrico. Ademais, observa-se uma inversão no fluxo tradicional de energia: antes restrito da distribuidora para o consumidor, agora os próprios consumidores, por meio da geração distribuída, podem injetar energia na rede, alterando a lógica de operação e comercialização do setor elétrico.

O avanço dessa nova lógica foi consolidado com a Lei nº 14.300, de 6 de janeiro de 2022, que institui o Marco Legal da Geração Distribuída. Essa legislação estabelece o Sistema de Compensação de Energia Elétrica (SCEE) e define regras para os consumidores que desejam produzir sua própria energia, promovendo um ambiente regulatório mais estável e transparente, favorecendo o avanço da geração em pequena escala no Brasil.

Durante várias décadas, a energia hidrelétrica tem representado a principal matriz de

produção de energia elétrica no Brasil, devido à sua competitividade econômica e à abundância dessa fonte no país. Atualmente, a potência total instalada no sistema de geração elétrica ultrapassa 181.610 MW, dos quais 110 GW são provenientes de usinas hidrelétricas. Essa predominância deve-se à vasta extensão territorial do Brasil, que abriga numerosos planaltos e rios de grande volume (SOUZA; MOREIRA, 2023).

No Brasil, o ONS é o órgão encarregado de gerenciar as atividades de geração e transmissão de energia elétrica. Composto por membros associados e participantes provenientes das empresas de geração, o ONS gerencia o complexo sistema elétrico nacional. Nesse sistema, os geradores produzem energia que é transportada pelos transmissores até as subestações localizadas em grandes centros de consumo, onde as distribuidoras levam a eletricidade às unidades consumidoras finais (FERREIRA; PINTO; SANTOS, 2017).

A energia gerada nas usinas individuais é transmitida por longas distâncias utilizando linhas de transmissão de alta tensão até subestações distribuidoras. Nessas subestações, a energia é rebaixada para tensões menores adequadas ao consumo final pela rede de distribuição. Assim, os consumidores podem acessar a energia elétrica de duas maneiras: através do mercado regulado ou do mercado livre (CUTSEM et al., 2020).

O consumo por meio do mercado regulado, também conhecido como mercado cativo, ocorre quando os consumidores adquirem eletricidade diretamente das concessionárias locais. Atualmente, esse tipo de consumo abrange a maioria dos consumidores brasileiros, "sobretudo entre os que não possuem acesso a negociar a compra de energia com diferentes distribuidores (AGUIAR; RAMOS, 2008).

No mercado livre, os consumidores podem negociar diretamente com os fornecedores aspectos como preço, prazo, reajustes e a fonte de energia, incluindo opções renováveis. Além disso, há a possibilidade de obter descontos, como os 50% sobre as tarifas de uso do sistema de distribuição (TUSD) para energia proveniente de fontes incentivadas, como eólica e solar (ABRACEEL, 2024).

Com uma matriz elétrica composta majoritariamente por fontes renováveis, o Brasil ocupa posição de destaque no cenário internacional, superando a média dos países da OCDE com mais de 84% da sua capacidade instalada oriunda de fontes limpas. Esse perfil energético vem se diversificando ainda mais com o avanço da geração distribuída, especialmente a partir da energia solar fotovoltaica. Dados da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) indicam que, até o final de 2023, já existiam mais de 2,3 milhões de sistemas de micro e minigeração distribuída conectados à rede elétrica nacional, somando uma potência instalada superior a 25,8 GW. Entre esses sistemas, quase todos operam por meio da fonte solar fotovoltaica, demonstrando a ampla preferência por essa alternativa no modelo descentralizado de geração de energia.

A geração distribuída fotovoltaica vem se expandindo impulsionada por fatores como a

queda nos custos dos sistemas, incentivos regulatórios e o interesse crescente dos consumidores por maior autonomia energética. De acordo com a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), a geração solar fotovoltaica registrou um aumento superior a 20 TWh em 2023 em comparação ao ano anterior, consolidando-se como uma das fontes de energia mais relevantes no Brasil.

Esse movimento revela não apenas mudanças nos hábitos de consumo e nas formas de geração de energia, mas também destaca a capacidade do Brasil de assumir um papel de liderança na transição energética global, ao adotar modelos mais sustentáveis e socialmente participativos.

### 3 IMPACTOS QUE A TECNOLOGIA BLOCKCHAIN PODE OCASIONAR NA GESTÃO E NA DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Nas décadas mais recentes, o setor energético vem passando por transformações impulsionadas por demandas de maior eficiência, descentralização e sustentabilidade. Nesse contexto, a tecnologia blockchain tem emergido como uma das inovações mais promissoras para reconfigurar a forma como a energia elétrica é produzida, distribuída e comercializada. Originalmente desenvolvida como a infraestrutura subjacente às criptomoedas, como o *Bitcoin*, o blockchain evoluiu para abarcar uma ampla gama de aplicações, oferecendo segurança, transparência e descentralização nas transações digitais (NARAYANAN et al., 2016).

No âmbito do setor elétrico, o uso do blockchain pode possibilitar a implementação de estruturas inovadoras de governança e entrega de energia, como os chamados sistemas Peer-to-Peer (P2P), a geração distribuída e a automação contratual por meio dos smart contracts, ampliando a autonomia dos usuários e otimizando as operações (ANDONI et al., 2019). Além disso, a capacidade de registrar transações de energia de maneira segura e imutável contribui para o rastreamento da procedência da eletricidade e aumenta a confiabilidade nas transações, impulsionando a modernização da matriz energética.

Este capítulo propõe examinar os possíveis efeitos decorrentes da aplicação da tecnologia blockchain nos mecanismos de gerenciamento e distribuição de energia elétrica. Serão consideradas suas principais aplicações, os desafios regulatórios envolvidos e os avanços verificados tanto no cenário nacional quanto internacional. A análise será conduzida de forma crítica, abordando iniciativas em curso, dificuldades técnicas e jurídicas, além das perspectivas que se abrem para a construção de um sistema energético mais seguro, descentralizado e eficiente.

A tecnologia blockchain oferece múltiplas aplicações no setor energético, destacando-se sua integração com redes inteligentes (smart grids), modelos de geração distribuída, veículos elétricos e casas conectadas (smart homes). Estimativas indicam que aproximadamente 140 iniciativas inovadoras já utilizam essa tecnologia, abrangendo desde negociações no mercado atacadista e varejista de energia até plataformas de transações Peer-to-Peer (P2P). No ambiente varejista, é frequente a associação da blockchain com criptomoedas, ativos digitais e formas de investimento descentralizado (ANDONI et al., 2019).

O setor energético tem sido palco de diversas iniciativas experimentais. Um exemplo significativo é o estudo desenvolvido por Verma e sua equipe (VERMA et al., 2018), que descreve o projeto "EnerPort". Essa proposta colaborativa, realizada na Irlanda, é apoiada pelo Centro Internacional de Pesquisa Energética, em parceria com a Universidade Nacional da Irlanda e a University College Cork. O propósito do projeto é explorar o uso da tecnologia blockchain na elaboração de um sistema que contempla comercialização energética do tipo

Peer-to-Peer (P2P), possibilitando transações diretas entre microrredes.

Nesse contexto, também se destaca o estudo de Mengelkamp e colaboradores (MENGELKAMP et al., 2018), que examinou o projeto Brooklyn Microgrid, desenvolvido em Nova York. Considerado um dos primeiros sistemas peer-to-peer (P2P) baseados em blockchain implementados com êxito, o projeto já alcança seu terceiro ano de operação. A plataforma possibilita que aproximadamente quinhentos usuários realizem, transações de compra e venda de energia por meio de um aplicativo móvel. Essa solução representa uma alternativa simplificada em relação ao mercado livre regional e aos serviços convencionais oferecidos pelas distribuidoras tradicionais.

Outro caso relevante é o da plataforma desenvolvida pelo banco espanhol Kutxabank. Essa solução emprega contratos inteligentes em iniciativas voltadas à geração hidrelétrica e em instalações eólicas específicas, dispensando a atuação de intermediários nos processos de negociação e garantindo a certificação da procedência da energia comercializada (ROVERSI et al., 2020).

Além desses já citados, a empresa norueguesa Vattenfall, também implementou uma infraestrutura blockchain operando em rede privada. Essa estrutura possibilita o registro transparente das transações realizadas por consumidores residenciais e comerciais, sendo capazes de comercializar a energia gerada por meio de painéis fotovoltaicos ou sistemas de armazenamento em baterias (KOSOWATZ, 2019).

Por meio da plataforma PowerLedger, que utiliza mecanismos de negociação e compensação baseados em tecnologia blockchain, os proprietários de sistemas de geração renovável podem comercializar o excedente de eletricidade a preços previamente definidos. Essas transações são viabilizadas tanto em ambientes de micro redes quanto através da infraestrutura convencional de distribuição (MARKETPLACE, 2020).

### **3.1 A Aplicação da Tecnologia Blockchain no Setor Elétrico Nacional e Internacional**

Diversas nações têm investido em iniciativas piloto ou estruturais que aplicam o blockchain ao setor energético. A regulação da tecnologia blockchain em âmbito internacional tem apresentado evolução de maneira acelerada, impulsionada pela crescente incorporação da solução tecnológica e pelas preocupações com segurança jurídica, lavagem de dinheiro e proteção ao consumidor. Cada país tem adotado abordagens distintas, variando de legislações amplas e favoráveis à inovação até medidas mais restritivas e de controle.

Na União Europeia, foi aprovado o *Markets in Crypto-Assets Regulation (MiCA)*, um marco regulatório robusto que busca estabelecer regras claras para o setor, com exigências de licenciamento, transparência e proteção contra crimes financeiros. A legislação será implementada de forma escalonada a partir de 2024, com regras adicionais previstas até 2026 (DATA40, 2024).

Entre os países que mais evoluíram nesse campo, a Suíça ocupa posição de destaque.

O país implementou a *Distributed Ledger Technology (DLT) Act*, que fornece segurança jurídica para operações baseadas em blockchain, promovendo um ambiente atrativo para *startups* e empresas do setor (DATA40, 2024). De forma semelhante, o Japão adotou uma abordagem proativa, com a atuação da Agência de Serviços Financeiros (FSA) e da *Japan Virtual Currency Exchange Association (JVCEA)*, regulando *exchanges* e estabelecendo mecanismos de supervisão e autorregulação (SCB10X, 2024).

Outros países asiáticos também têm se destacado. A Coreia do Sul, por exemplo, aprovou a Lei de Proteção aos Usuários de Ativos Virtuais, exigindo que empresas de criptoativos adotem medidas como seguro, reservas financeiras e monitoramento de transações (COINTEETH, 2024). Já Singapura adota uma regulamentação equilibrada por meio da Lei de Serviços de Pagamento (PSA), exigindo licenciamento e implementando diretrizes de governança para proteger investidores (SCB10X, 2024).

No Reino Unido, o governo está em processo de escuta da indústria para definir regras mais claras, com participação ativa da *Financial Conduct Authority (FCA)*, que busca alinhar proteção ao consumidor e estímulo à inovação (FN LONDON, 2024). Enquanto isso, nos Estados Unidos, o cenário regulatório ainda é fragmentado. Apesar de propostas legislativas como o “*Financial Innovation and Technology for the 21st Century Act*”, o país carece de um marco federal consolidado, sendo que projetos como o de regulamentação das *stablecoins* enfrentam resistência no Congresso (AP NEWS, 2024).

Na América Latina, a Argentina avança com medidas fiscais e alinhamento às diretrizes do Grupo de Ação Financeira Internacional (GAFI), enquanto o Uruguai aprovou uma lei que coloca o banco central como regulador do setor de ativos digitais (REUTERS, 2024; HACKERNOON, 2024). A Austrália também caminha para consolidar sua legislação, exigindo que plataformas digitais obtenham licenças específicas para operar legalmente (CHAMBERS, 2024).

Apesar de ainda se encontrar em estágio inicial, a aplicação do blockchain no setor elétrico brasileiro já conta com pesquisas e projetos em andamento. O mercado nacional de energia elétrica vem passando por um processo de abertura gradual, impulsionado principalmente pela expansão do Mercado Livre de Energia, que possibilita a determinados consumidores a escolha de seus fornecedores. No entanto, os consumidores residenciais continuam inseridos no chamado mercado cativo, sem acesso a esse modelo. Nos últimos anos, o arcabouço legal relacionado ao mercado livre tem avançado com a finalidade de ampliar o acesso e estimular a concorrência no setor. Um marco importante ocorreu em 1º de janeiro de 2024, quando todos os consumidores ligados em alta e média tensão (Grupo A) passaram a ter o direito de migrar para o Ambiente de Contratação Livre (ACL), conforme determina a Portaria Normativa nº 50/2022 do Ministério de Minas e Energia (NEOENERGIA, 2024).

Essa mudança regulatória possibilitou que pequenos e médios empreendimentos, como padarias, supermercados e farmácias, negociassem diretamente com fornecedores de energia,

gerando uma possível economia de até 35% nos custos (NEOENERGIA, 2024). Além disso, consumidores com demanda entre 500 kW e 1.000 kW, antes classificados como consumidores especiais, passaram a ter liberdade para contratar energia de qualquer fonte, e não apenas de fontes incentivadas (EDP, 2024). Nesse cenário, a tecnologia blockchain pode ampliar significativamente essa economia ao possibilitar transações diretas e seguras entre as partes, dispensando intermediários, o que diminui encargos e torna o processo mais transparente e eficiente. Através de contratos inteligentes, os acordos são automaticamente executados ao serem cumpridas as condições previamente estabelecidas, eliminando custos operacionais extras e aumentando a confiança nas negociações dentro do mercado livre de energia.

Para consumidores conectados em baixa tensão (Grupo B), como residências e pequenos comércios, a abertura total ainda está em discussão. O Ministério de Minas e Energia anunciou que essa abertura deve ocorrer a partir de 2026, permitindo que esses consumidores também escolham seu fornecedor de energia (CENÁRIO ENERGIA, 2025). Adicionalmente, há uma minuta de projeto de lei em tramitação que propõe a abertura total do mercado livre a partir de 2028, além do fim dos descontos para consumo de matrizes renováveis no mercado livre após o fim dos contratos vigentes (PV MAGAZINE BRASIL, 2025).

Portanto, a legislação atual segue o rumo para uma abertura progressiva do mercado, com impacto direto na livre escolha dos consumidores e no potencial uso de tecnologias inovadoras, como o blockchain, para negociação direta e segura de energia. A proposta de liberalização total do mercado de energia elétrica, apresentada na Consulta Pública nº 33/2019 do Ministério de Minas e Energia (MME), já foi encerrada, mas suas diretrizes seguem em debate no setor. A possível abertura do mercado para consumidores de menor porte, inclusive residenciais, pode desenvolver um cenário favorável à aplicação do blockchain, permitindo a compra direta de energia via contratos inteligentes, de forma descentralizada com segurança.

Órgãos como o MME, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e a Empresa de Pesquisa Energética (EPE) têm acompanhado o crescente desenvolvimento das tecnologias, mas até o momento não há uma regulamentação específica para o uso de blockchain. Entretanto, em documentos técnicos e eventos do setor, o tema tem sido discutido como candidato para modernização da infraestrutura energética brasileira (ANEEL, 2023; EPE, 2020).

A aplicação da tecnologia pode influenciar positivamente na eficiência operacional do sistema elétrico brasileiro, diminuir fraudes, e permitir a rastreabilidade da energia desde sua geração até o consumo final. No entanto, desafios como a falta de regulamentação certa, a demanda de integração com sistemas legados e o custeio de implementação ainda dificultam sua adoção em larga escala.

É essencial que o Brasil aprofunde o debate em torno das políticas públicas e da regulação tecnológica, a fim de viabilizar todo o potencial do blockchain, sobretudo diante da

perspectiva de plena liberalização do mercado de energia elétrica. Isso inclui o acompanhamento de projetos piloto, participação em projetos internacionais, e incentivar a revolução digital por meio de ambientes regulatórios controlados.

Nesse contexto, a tecnologia blockchain oferece um nível aprimorado de rastreabilidade, permitindo que os consumidores escolham fontes de energia mais eficientes. Isso é particularmente útil para atender às demandas em grandes leilões nacionais organizados pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) (AGUIAR; RAMOS, 2008).

A partir de janeiro de 2024, o mercado livre de energia passou por uma ampliação. A partir da implementação da Portaria nº 50/2022 do Ministério de Minas e Energia, todos os consumidores do Grupo A, ou seja, aqueles conectados a redes de média e alta tensão, passaram a ter o direito de escolher livremente seu fornecedor de energia elétrica, independentemente da demanda contratada. Anteriormente, apenas consumidores com demanda superior a 500 kW tinham acesso a esse ambiente de contratação. Essa mudança permitiu que pequenas e médias empresas, como padarias, supermercados e escritórios, migrassem para o mercado livre, buscando condições mais vantajosas de fornecimento. Estima-se que, até o final de 2025, mais de 27 mil novas unidades consumidoras tenham aderido a essa modalidade, sendo 95% delas empresas de menor porte (ABRACEEL, 2024).

Portanto, embora o blockchain ainda não possua um marco regulatório global unificado, há um movimento crescente e coordenado em várias jurisdições no sentido de criar regras que permitam o uso seguro e eficiente da tecnologia, fomentando inovação sem renunciar à proteção jurídica e institucional.

Apesar dos avanços regulatórios em diversas jurisdições e da abertura progressiva do mercado brasileiro de energia, é importante refletir criticamente sobre a viabilidade prática da integração do blockchain nesse contexto. Alguns autores demonstram entusiasmo quanto à capacidade dessa tecnologia de transformar o setor energético por meio da descentralização e da rastreabilidade (AGUIAR; RAMOS, 2008), mas é preciso ponderar que o sucesso dessa aplicação está condicionado a diversos fatores de ordem técnica, econômica e institucional, os quais ainda carecem de consolidação, particularmente no contexto brasileiro.

Enquanto países como Suíça, Japão e Coreia do Sul avançam com regulamentações específicas e infraestrutura voltada à inovação, o Brasil carece de uma estratégia nacional clara para o uso do blockchain no setor elétrico. Além disso, o fato de a maioria dos consumidores ainda estar no mercado cativo limita o alcance de inovações voltadas à comercialização direta de energia. A previsão de abertura do mercado livre aos consumidores de baixa tensão apenas para os próximos anos, entre 2026 e 2028, reforça a ideia de que a adoção do blockchain poderá enfrentar obstáculos estruturais, ao menos até que ocorra uma reformulação mais abrangente no modelo de contratação do setor elétrico.

Além disso, há divergências relevantes na literatura sobre o real potencial do blockchain em ambientes altamente regulados como o setor elétrico. Para alguns estudiosos, o uso da tecnologia pode aumentar a complexidade do sistema, exigindo elevados investimentos

em integração digital e interoperabilidade com os sistemas existentes, sem garantias de que os benefícios superem os custos. Outros autores, mais otimistas, apontam que a descentralização e a automação por contratos inteligentes trariam ganhos substanciais em termos de eficiência, segurança e transparência, principalmente se combinados com o avanço da geração distribuída.

Nesse cenário, faz-se importante fomentar o debate relacionado ao emprego do blockchain no setor energético para que vá além do tecnicismo e considere aspectos políticos, sociais e econômicos. A criação de *regulatory sandboxes*, por exemplo, pode ser um caminho viável para testar aplicações reais sem comprometer a estabilidade do sistema. No entanto, isso só será eficaz se houver coordenação entre os entes reguladores e abertura ao diálogo com universidades, *startups* e empresas do setor.

Tendo como referência a análise de estudos recentes conduzidos pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), pelo Grupo de Estudos do Setor Elétrico da UFRJ (GESEL) e pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), foi possível identificar cinco tecnologias estratégicas com destaque para o período de 2024 a 2028: blockchain, inteligência artificial, Internet das Coisas (IoT), *Big Data* e realidade aumentada. O quadro 3, elaborada pelo autor com base nas informações extraídas desses estudos (ANEEL, 2023; EPE, 2020; GESEL, 2023), apresenta o impacto estimado (em uma escala de 0 a 5) e a expectativa de adoção dessas tecnologias no setor elétrico brasileiro. O blockchain, por exemplo, se destaca com impacto alto e adoção esperada significativa, especialmente em aplicações relacionadas à geração distribuída, rastreabilidade e automação de transações energéticas.

Tabela 1 – Tecnologias digitais emergentes no setor elétrico brasileiro: impacto estimado e adoção esperada (2024–2028)

<b>Tecnologia</b>	<b>Impacto Estimado (0–5)</b>	<b>Adoção Esperada (2024–2028)</b>
Blockchain	4,5	Alta
Inteligência Artificial	4,8	Muito Alta
Internet das Coisas (IoT)	4,7	Muito Alta
Realidade Aumentada	3,8	Média
Big Data	4,6	Alta

Fonte: Elaborado pelo autor com base em ANEEL (2023); EPE (2020); GESEL (2023).

Diante disso, reconhece-se que o blockchain configura-se como uma tecnologia com grande potencial. No entanto, sua adoção requer um arcabouço regulatório mais consolidado, aportes significativos em infraestrutura digital e, principalmente, um direcionamento estratégico contínuo por parte do poder público. Na ausência dessas condições, corre-se o risco de que apenas grandes corporações se beneficiem da inovação, deixando de fora pequenos agentes produtores e consumidores da desejada transição energética descentralizada.

## 4 CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como foco analisar os impactos potenciais da tecnologia blockchain sobre os mecanismos de controle e distribuição de energia elétrica, abordando tanto seus fundamentos quanto os desdobramentos práticos observados em contextos internacionais e no cenário brasileiro. A partir dessa perspectiva, foi possível alcançar os objetivos específicos traçados, oferecendo uma compreensão ampliada das oportunidades e limitações associadas à incorporação dessa inovação no setor elétrico.

Inicialmente, ao explorar o funcionamento do blockchain, verificou-se que essa tecnologia opera com base em uma estrutura distribuída, transparente e segura, capaz de registrar transações de forma permanente por redes descentralizadas. Tais características conferem ao blockchain um papel relevante na modernização de setores que exigem alta confiabilidade e rastreamento de dados, como o da energia.

Na etapa seguinte, ao examinar experiências globais, identificou-se que diversos países vêm implementando soluções baseadas em blockchain. Destacam-se casos como a Brooklyn Microgrid (EUA), a iniciativa EnerPort (Irlanda) e os projetos conduzidos pela empresa Vattenfall (Europa). Tais exemplos evidenciam a viabilidade de modelos descentralizados de negociação energética, além de facilitarem a incorporação de sistemas de geração distribuída e oferecerem maior autonomia ao consumidor final. Por outro lado, essas experiências reforçam a importância de um ambiente regulatório estável e da presença de infraestrutura tecnológica adequada para assegurar a adoção em larga escala.

No cenário brasileiro, embora o uso do blockchain ainda seja incipiente no setor elétrico, observam-se avanços na abertura do mercado de energia e nas discussões regulatórias, o que indica um movimento de transformação e modernização. Esse contexto favorece a introdução de novas tecnologias, especialmente em operações envolvendo pequenos geradores e consumidores. A crescente expansão da geração distribuída no país, especialmente por fontes como a energia solar fotovoltaica, amplia a complexidade da gestão energética, exigindo ferramentas eficazes para medição, controle e contabilização da energia gerada e consumida localmente. A inexistência de normas específicas que regulamentem esses modelos tecnológicos, contudo, ainda representa uma barreira, exigindo atuação coordenada de instituições como o MME, ANEEL e EPE, a fim de garantir segurança jurídica, transparência e eficiência operacional.

Diante disso, conclui-se que o blockchain representa uma tecnologia com potencial para transformar a estrutura e os mecanismos de distribuição do setor elétrico. Para que esse potencial se materialize no Brasil, é necessário superar entraves regulatórios e técnicos por meio de políticas públicas, incentivo à pesquisa e desenvolvimento e a promoção de projetos experimentais. Dessa forma, o país poderá alinhar-se às tendências internacionais e avançar rumo a um setor elétrico mais sustentável, inteligente e voltado ao do consumidor.

## REFERÊNCIAS

- ABRACEEL. *Previsão de novos consumidores no mercado livre de energia supera 27 mil até 2025*. 2024. Disponível em: <https://abraceel.com.br/press-releases/2024/07/previsao-de-novos-consumidores-no-mercado-livre-de-energia-supera-27-mil-ate-2025>. Acesso em: 28 abr. 2025.
- AGUIAR, O. S.; RAMOS, F. S. *O mercado brasileiro de energia elétrica: critérios de decisão na migração de consumidores para o ambiente de contratação livre*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2008.
- AHL, A. et al. Review of *Blockchain* -based distributed energy: implications for institutional development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 107, p. 200–211, 2019.
- 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.
- ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica estuda impacto do blockchain no consumo de energia. *Livecoins*, 18 ago. 2023. Disponível em: <https://livecoins.com.br/aneel-estuda-consumo-eletrico-da-blockchain/>. Acesso em: 14 maio 2025.
- AP NEWS. *Federal stablecoin bill blocked in Senate committee as US looks to regulate cryptocurrency*. 2024. Disponível em: <https://apnews.com/article/b38d40abff48b48902f8249eb4ef626b>. Acesso em: 14 maio 2025.
- BAJAY, S. V. Avaliação crítica do atual modelo institucional do setor elétrico brasileiro. In: *Congresso Brasileiro de Energia*. [S.l.: s.n.], 2010.
- BARTHOLOMEU, D. B.; PÉRAZ, T. G.; CAIXETA-FILHO, J. V. Logística sustentável: avaliação de estratégias de redução das emissões de co2 no transporte rodoviário de cargas. *The Journal of Transport Literature*, v. 10, 2016.
- BRASIL. *Lei nº 10.848, de 15 de março de 2004*. Dispõe sobre a comercialização de energia elétrica. Disponível em: [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2004-2006/2004/lei/110.848.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2004-2006/2004/lei/110.848.htm). Acesso em: 19 jun. 2025.
- BRASIL. *Lei nº 14.300, de 6 de janeiro de 2022*. Institui o marco legal da microgeração e minigeração distribuída. Disponível em: [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2019-2022/2022/lei/L14300.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2022/lei/L14300.htm). Acesso em: 19 jun. 2025.
- BRILLIANTOVA, V.; THURNER, T. W. *Blockchain and the future of energy*. *Technology in Society*, v. 57, p. 38–45, 2019.
- CANAL ENERGIA. *CPFL Energia lança programa de aceleração de startups*. Canal Energia, 4 ago. 2022. Disponível em: <https://www.canalenergia.com.br/noticias/53038354/cpfl-energia-lanca-programa-de-aceleracao-de-startups>. Acesso em: 28 abr. 2025.
- CAPELO, C. *ESCOs e contratos de desempenho energético: preenchendo o "Gap" de eficiência energética através da economia da performance*. Lisboa, 2011.
- CENÁRIO ENERGIA. *Governo confirma abertura total do mercado livre de energia para 2026 e promete liberdade de escolha ao consumidor*. 2025. Disponível em:

<https://cenarioenergia.com.br/2025/04/11/governo-confirma-abertura-total-do-mercado-livre-de-energia-para-2026-e-promete-liberdade-de-escolha-ao-consumidor>. Acesso em: 14 maio 2025.

CHAMBERS AND PARTNERS. *Blockchain 2024 – Global Practice Guide*. 2024. Disponível em: <https://practiceguides.chambers.com/practice-guides/blockchain-2024>. Acesso em: 14 maio 2025.

CHEN, R. Y. A traceability chain algorithm for artificial neural networks using t-s fuzzy cognitive maps in *Blockchain. Future Generation Computer Systems*, v. 80, p. 198–210, 2018.

COINTEETH. *Overview of global national or regional legislation and regulation of cryptocurrencies*. 2024. Disponível em: <https://www.cointeeth.com/news/overview-of-global-national-or-regional-legislation-and-regulation-of>. Acesso em: 14 maio 2025.

CUTSEM, O. V. et al. Cooperative energy management of a community of smart buildings: a *Blockchain approach*. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, v. 117, 2020.

DATA40. *Leading Countries in Cryptocurrency Regulation in 2024*. 2024. Disponível em: <https://data40.com/articles/leading-countries-in-cryptocurrency-regulation-in-2024>. Acesso em: 14 maio 2025.

DICK, C. I.; PRAKTINKJO, A. *Blockchain technology and electricity wholesale markets: expert insight on potentials and challenges for otc trading in europe*. *Energies*, v. 12, n. 5, p. 832, 2019.

DORRI, A. et al. Spb: A secure private *Blockchain* -based solution for distributed energy trading. *IEEE Communications Magazine*, v. 57, n. 7, p. 120–126, 2019.

EDP. *Entenda como está o mercado livre de energia no Brasil em 2024*. 2024. Disponível em: <https://solucoes.edp.com.br/blog/mercado-livre-de-energia-brasileiro-2024>. Acesso em: 14 maio 2025.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (Brasil). *Balanco Energético Nacional 2023: ano base 2022*. Rio de Janeiro: EPE, 2023. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-748/topico-687/BEN2023.pdf>. Acesso em: 28 abr. 2025.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (Brasil). *Balanco Energético Nacional 2024: ano base 2023*. Rio de Janeiro: EPE, 2024. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2024>. Acesso em: 14 maio 2025.

EPE. Empresa de Pesquisa Energética. *Análise do uso de tecnologias digitais no setor elétrico: blockchain, big data e IoT*. Relatório Técnico, Cooperação Internacional PSR/GIZ/RED. Rio de Janeiro: EPE, 2020. Disponível em: [https://www.epe.gov.br/sites-pt/areas-de-atuacao/cooperacao-internacional/ArquivosCooperacaoInternacional/PSR\\_GIZ\\_RED\\_Produto\\_1\\_1\\_Final.pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/areas-de-atuacao/cooperacao-internacional/ArquivosCooperacaoInternacional/PSR_GIZ_RED_Produto_1_1_Final.pdf). Acesso em: 14 maio 2025.

FERREIRA, J. E.; PINTO, F. G. C.; SANTOS, S. C. Estudo de mapeamento sistemático sobre as tendências e desafios do *Blockchain*. *Gestão Org.*, v. 15, p. 108–117, 2017.

FN LONDON. *UK policymakers must listen to industry participants on crypto regulations*.

2024. Disponível em: <https://www.fnlonon.com/articles/uk-policymakers-must-listen-to-industry-participants-on-crypto-regulations-5be5a812>. Acesso em: 14 maio 2025.

GABRICH, Y. B.; COELHO, I. M.; COELHO, V. N. Tendências para sistemas microgrids em cidades inteligentes: uma visão sobre a *Blockchain*. In: *Anais do 49º Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional*. [S.l.: s.n.], 2017.

GURCAN, O. Na industrial prototype of trusted energy performance contracts using *Blockchain technology*. In: *International Conference on High Performance Computing and Communications*. [S.l.]: IEEE, 2018.

HACKERNOON. 2025: *More than 100 jurisdictions have crypto regulation*. 2024. Disponível em: <https://hackernoon.com/2025-more-than-100-jurisdictions-have-crypto-regulation>. Acesso em: 14 maio 2025.

HESSE, R. *Avaliação de tempos e custos transacionais com uso do Blockchain como substituto de um agente intermediador*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018.

HILEMAN, G.; RAUCHS, M. *Global Blockchain benchmarking study*. United Kingdom, 2017.

IBERDROLA. *Blockchain no mercado energético: como pode o 'Blockchain' confirmar a origem da energia verde?* [S.l.], 2019. 1 p.

KHATOON, A. et al. *Blockchain in energy efficiency: potential applications and benefits*. *Energies*, v. 12, n. 17, p. 3317, 2019.

KIM, S. M. et al. Security issues on smart grid and *Blockchain* -based secure smart energy management system. *MATEC Web of Conferences*, v. 260, p. 1–5, 2019.

KOSOWATZ, J. *Blockchain enables new power markets*. *Mechanical Engineering*, v. 141, n. 6, p. 26–31, 2019.

MACHADO, S. Novo modelo de comercialização de energia elétrica utilizando *Blockchain*, um estímulo à geração distribuída e aos veículos elétricos. *Revista Brasileira de Energia Solar*, v. 11, n. 1, p. 89–96, 2020.

MARKETPLACE. *Power Ledger – a new decentralized energy*. [S.l.], 2020. Accessed: 15 Aug 2024. Disponível em: <<https://www.powerledger.io/>>.

MARQUES, N. L. *Um modelo para oferta de certificado de energia renovável na Blockchain sob incerteza e flexibilidade*. Tese (Doutorado) — Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro, 2019.

MENGELKAMP, E. et al. Designing microgrid energy markets: A case study. the brooklyn microgrid. *Applied Energy*, v. 210, p. 870–880, 2018.

MYLREA, M.; GOURISETTI, S. N. G. *Blockchain for smart grid resilience: exchanging distributed energy at speed, scale and security*. *IEEE Communications Magazine*, p. 18–23, 2017.

NARAYANAN, A. et al. *Bitcoin and Cryptocurrency Technologies: A Comprehensive Introduction*. Princeton: Princeton University Press, 2016.

NATARAJAN, H.; KRAUSE, S.; GRADSTEIN, H. *Distributed ledger technology and*

*Blockchain*. [S.l.], 2017.

NEOENERGIA. *Migração ao mercado livre de energia*. 2024. Disponível em: <https://www.neoenergia.com/web/rn/seu-negocio/migracao-ao-mercado-livre-de-energia>. Acesso em: 14 maio 2025.

NETO, C. A. S. *O advento dos criptoativos sob a perspectiva jurídica da arrecadação tributária no Brasil*. João Pessoa, 2023.

NUNES, Paulo Ricardo Moneta. Utilização de blockchain em redes de comunicação industrial. 2021. 66 f. *Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Controle e Automação)* – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2021. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/48338>. Acesso em: 28 abr. 2025.

O'DONOVAN, P.; O'SULLIVAN, D. T. J. A systematic analysis of real-world energy *Blockchain initiatives*. *Future Internet*, MDPI, v. 11, n. 174, p. 1–14, 2019. 15

PAULA, V. A. *Venda de energia por Blockchain*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, São Carlos, 2019.

PIMAZZONI, E. E. *Blockchain no setor elétrico brasileiro: desafios da permissionless innovation*. Tese (Doutorado) — Universidade Nove de Julho, São Paulo, 2021.

POP, C. et al. *Blockchain*-based scalable and tamper-evident solution for registering energy data. *Sensors*, v. 19, n. 14, p. 3033, 2019.

PORTAL DO BITCOIN. *Governo brasileiro investe R\$ 330 mil em estudo de Blockchain para CPFL*. Portal do Bitcoin, 16 nov. 2020. Disponível em: <https://portaldobitcoin.uol.com.br/governo-brasileiro-investe-r-330-mil-em-estudo-de-Blockchain-para-cpfl/>. Acesso em: 28 abr. 2025.

PV MAGAZINE BRASIL. *Governo deve propor abertura total do mercado livre até 2028 e fim de descontos para renováveis*. 2025. Disponível em: <https://www.pv-magazine-brasil.com/2025/05/12/governo-deve-propor-abertura-total-do-mercado-livre-ate-2028-e-fim-de-descontos-para-renovaveis>. Acesso em: 14 maio 2025.

QUEIROZ, M. M.; WAMBA, S. F. *Blockchain adoption challenges in supply chain: an empirical investigation of the main drivers in india and the usa*. *International Journal of Information Management*, v. 46, p. 70–82, 2019.

REVOREDO, T. *Blockchain – Tudo o que você precisa saber: Potencial e realidade*. 1. ed. São Paulo: Tatiana Revoredo, 2018.

REUTERS. *Argentina looks to tame crypto market; money laundering fears draw scrutiny*. 2024. Disponível em: <https://www.reuters.com/markets/currencies/argentina-looks-tame-crypto-market-money-laundering-fears-draw-scrutiny-2024-07-18>. Acesso em: 14 maio 2025.

ROVERSI, K. et al. *Tecnologia Blockchain no setor elétrico: impactos e aplicações*. [S.l.], 2020. v. 6, n. 11, 87005–87016 p.

SCB10X. *Global Landscape of Digital Asset Regulation in 2024*. 2024. Disponível em: <https://www.scb10x.com/en/blog/digital-asset-regulations-2024>. Acesso em: 14 maio 2025.

- SILVESTRE, M. L. D. *Blockchain for power systems: current trends and future applications*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 119, p. 109585, 2020.
- SOARES, P. H. R. B. *Contratos inteligentes através da Blockchain*. Goiânia, 2021.
- SOUZA, A. O.; MOREIRA, H. L. *Blockchain no mercado de energia: proposição de um modelo de comercialização de certificados*. *Revista Brasileira de Mecatrônica*, v. 6, n. 1, p. 1–27, 2023.
- TOKYO ELECTRIC POWER COMPANY HOLDINGS, INC. *TEPCO joins global energy blockchain initiative – Energy Web Foundation*. 10 maio 2017. Disponível em: [https://www.tepco.co.jp/en/announcements/2017/1422301\\_10494.html](https://www.tepco.co.jp/en/announcements/2017/1422301_10494.html). Acesso em: 28 abr. 2025.
- VERMA, P. et al. *Enerport: Irish Blockchain project for Peer-to-Peer energy trading*. *Energy Informatics*, v. 1, n. 1, p. 14, 2018.
- WANG, N. et al. *When energy trading meets Blockchain in electrical power system: the state of the art*. *Applied Sciences*, v. 9, n. 8, p. 1561, 2019.
- WU, J.; TRAN, N. *Application of Blockchain technology in sustainable energy systems: an overview*. *Sustainability*, v. 10, n. 9, p. 3067, 2018.