

Transição energética e *blockchain*: a descentralização como uma ferramenta

Raquel Pinto Coelho Perrota*

Universidade Federal do Estado do Rio de Janeiro

<https://orcid.org/0000-0003-1710-9697> 

Raphael Vieira da Fonseca Rocha**

Universidade Federal de Juiz de Fora

<https://orcid.org/0000-0002-1415-1323> 

Resumo: O presente artigo analisa o papel da tecnologia *blockchain* como instrumento de apoio à transição energética global, especialmente no contexto de governança ambiental e inovação tecnológica. Partindo da noção de meio ambiente como patrimônio comum da humanidade e das recentes decisões da Corte Interamericana de Direitos Humanos e da Corte Internacional de Justiça que reconhecem o direito a um ambiente saudável, o estudo discute a necessidade de soluções descentralizadas para enfrentar a crise climática. Examina-se o potencial da *blockchain* para viabilizar o comércio descentralizado de energia, a rastreabilidade de certificados verdes e a transparência no mercado de carbono, com destaque para experiências na Alemanha, país de vanguarda na aplicação da tecnologia ao setor energético. O artigo também identifica desafios ambientais, tecnológicos e regulatórios para sua adoção, como o alto consumo energético, a falta de padronização normativa e as questões de cibersegurança. Conclui-se que a *blockchain* possui potencial transformador na promoção de eficiência, democratização e sustentabilidade no setor energético, desde que equilibrada por políticas públicas e marcos regulatórios eficazes.

Palavras-chave: Transição energética; Meio ambiente; Crise climática; *Blockchain*; Descentralização.

* Mestre em Direito Internacional pela Universidade de Aberdeen/UnB. E-mail: rpfcoelho@gmail.com

** Doutor em Direito Internacional pela Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ). E-mail: raphael.vieira@ufff.br



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA

Programa de Pós-Graduação em Ciências Jurídicas

DOI: <https://doi.org/10.22478/ufpb.1678-2593.2025v24n57.76778>

Transição energética e *blockchain*: a descentralização como uma ferramenta

Raquel Pinto Coelho Perrota

Raphael Vieira da Fonseca Rocha

1 INTRODUÇÃO

Ao final da década de 90, enquanto o mundo se debruçava sobre a lógica da globalização, foram trabalhadas abordagens do tema tanto sob uma perspectiva hegemônica¹, bem como sob um recorte contra-hegemônico². Nesse contexto, surgiu a análise do fenômeno da globalização a partir do que se convencionou chamar de patrimônio comum da humanidade. Trata-se da emergência de temas que, dada a sua natureza, são de tal forma globais como o próprio planeta, fazendo sentido apenas enquanto reportados ao globo na sua totalidade (Santos, 1997, p. 110 e 111).

A sustentabilidade da vida humana na Terra é o principal estandarte desse tipo de espraiamento de valores e ações. A proteção ao meio ambiente vem como assunto comum em seu nascedouro e tem se consolidado como um dos principais desafios no âmbito das relações internacionais.

¹ Ao tratar do tema, Boaventura de Sousa Santos, fala do localismo globalizado como “processo pelo qual determinado fenômeno local é globalizado com sucesso, seja a actividade mundial das multinacionais, a transformação da língua inglesa em língua franca, a globalização do fast food americano ou da sua música popular, ou a adopção mundial das leis de propriedade intelectual ou de telecomunicações dos EUA” (Santos, 1997, p. 109)

² Na obra de Boaventura de Sousa Santos, esse recorte ganha o nome de cosmopolitismo. Segundo o autor, trata-se da organização transnacional dos Estados-nação, regiões, classes ou grupos sociais subordinados de modo a defenderem os interesses percebidos como comuns, usando em seu benefício as possibilidades de interação transnacional criadas pelo sistema mundial. Exemplos disso são os diálogos e organizações Sul-Sul e as organizações mundiais de trabalhadores (a Federação Mundial de Sindicatos e a Confederação Internacional dos Sindicatos Livres) (Santos, 1997, p. 110).

A Corte Interamericana de Direitos Humanos, quando da Opinião Consultiva nº 23/2017³ e da análise do Caso Habitantes de La Oroya vs Peru (2023)⁴ estabeleceu o entendimento de que a proteção autônoma da natureza perfaz um dever, integrando ela as normas imperativas de Direito Internacional. Nessa mesma toada, no bojo da Opinião Consultiva nº 32/25⁵, a Corte IDH, ao também elevar o status jurídico da natureza, consolidou a imperatividade da não causação de danos ambientais irreversíveis, fortalecendo, assim, as obrigações estatais sob a égide de um padrão de diligência reforçada e do direito a um clima saudável.

Ainda em 2025, a Corte Internacional de Justiça emitiu opinião consultiva acerca das obrigações internacionais dos Estados no contexto das mudanças climáticas (Resolução nº 77/276), vindo a reconhecer o direito ao meio ambiente limpo, saudável e sustentável como um direito humano⁶⁷.

³ Na ocasião, a Corte Interamericana de Direitos Humanos reconheceu o direito ao meio ambiente saudável como direito autônomo, apontando, ainda, para a tendência de que se reconheça a ele personalidade jurídica. Nesse aspecto pondera tratar-se de “proteger a natureza e o meio ambiente não somente por sua conexão com uma utilidade para o ser humano ou pelos efeitos que sua degradação poderia causar em outros direitos das pessoas, como a saúde, a vida ou a integridade pessoal, senão por sua importância para os demais organismos vivos com quem se compartilha o planeta, também merecedores de proteção em si mesmos” (Corte IDH, 2017, para 62).

⁴ A Corte IDH avança para atribuir natureza *jus cogens* à proteção autônoma da natureza por entender tratar-se de obrigação internacional de grande transcendência (Corte IDH, 2023, para 129).

⁵ Ela reconhece a Natureza e os seus componentes como sujeitos de direito, além de estabelecer que a proibição de condutas antropogênicas que afetam de forma irreversível o equilíbrio vital dos ecossistemas, essenciais para a sobrevivência das gerações presentes e futuras, possui caráter *jus cogens* (Corte IDH, 2025, paras 6 e 281).

⁶ Nos dizeres da CIJ, “the Court is of the view that a clean, healthy and sustainable environment is a precondition for the enjoyment of many human rights, such as the right to life, the right to health and the right to an adequate standard of living including access to water, food and housing. The right to a clean, healthy and sustainable environment results from the interdependence between human rights and the protection of the environment.” (ICC, p.113, para 393)

⁷ Para uma melhor compreensão acerca das fases pelas quais passou a Corte Internacional de Justiça no reconhecimento do direito ao meio ambiente como direito autônomo e obrigação *erga omnes* no Direito Internacional, consulte: ROCHA, Raphael Vieira da Fonseca; RANGEL, Fernando López; SILVA, Iandra Rezende. Obrigação Erga Omnes e o Acervo Decisório da Corte Internacional de Justiça em Matéria Ambiental: aplicando o direito internacional na proteção do meio ambiente. Revista Brasileira de Direito Internacional. v. 10, n. 2. Florianópolis: 2025. DOI: 10.26668/IndexLawJournals/2526-0219/2024.v10i2.10955.

A premência da proteção internacional ao meio ambiente enquanto valor global, fomentada em grande medida pela chamada “tríplice crise planetária”, gerada pela relação e pela retroalimentação de três fenômenos concomitantes - a mudança climática, a contaminação e a perda da biodiversidade⁸—, impinge a todos a pensar a transição energética sob uma perspectiva de criatividade e efetividade, por vezes de modo a se lançar mão de ferramentas descentralizadoras do papel estatal.

A partir desse pano de fundo e no contexto do XXII Congresso Geral da Academia Internacional de Direito Comparado (Berlim, 2026), sob o guarda-chuva do tema 23 — Direito Ambiental — Transição Energética: regulamentação de novas fontes de energia, foi proposto um levantamento das iniciativas para a transição energética em variados países. Entre os muitos pontos abordados, indagou-se acerca da inovação tecnológica e as tendências do mercado, especialmente quanto aos desafios legais do comércio de energia de ponta a ponta e as aplicações da tecnologia *blockchain* no setor energético.

Diante desse cenário, e na busca por um mergulho mais profundo, o presente trabalho adota a problemática indicada como sua própria, de modo que se busque demonstrar quais são as implicações, os usos e os possíveis impactos da tecnologia *blockchain* no âmbito da transição energética no mundo.

As reflexões aqui trazidas, portanto, têm como objetivo geral analisar a tecnologia *blockchain* como instrumento de relevo na transição energética no globo. Para tanto, propõe-se no primeiro capítulo compreender a *blockchain* no comércio de energia de ponta a ponta e no mercado de carbono; sob o segundo recorte pretende-se

⁸ Corte, IDH. Caso Pueblos Indígenas U’wa y sus miembros vs. Colombia, Excepción Preliminar, Fondo, Reparaciones y Costas. Sentencia de 4 de julio de 2024. Serie C No. 530, párr. 304. A Corte advertiu, na ocasião do julgamento, que a tríplice crise planetária é um desafio complexo e multifacetado que requer uma resposta integrada e urgente a fim de garantir a sustentabilidade do planeta e o bem-estar de seus habitantes.

traçar um cenário de sua utilização na Alemanha, país de proeminência na utilização da *blockchain* no contexto da transição energética; por fim, em um terceiro capítulo, busca-se delimitar alguns dos desafios enfrentados para a sua adoção. A pesquisa não se limitará ao tipo jurídico-descritivo, já que terá por objeto também partir de premissas e condições vigentes para detectar tendências futuras de determinado instituto jurídico e/ou campo normativo. Nesse sentido, amolda-se, dentre a classificação proposta por Miracy Barbosa de Sousa Gustin (Gustin e Dias, 2010, p. 29), mais ao tipo jurídico-prospectivo, utilizando-se de fontes bibliográfica-documentais. Como método de pesquisa, adota-se o dedutivo, pelo qual o raciocínio lógico faz uso da dedução para obter uma conclusão sobre determinada premissa.

A hipótese aqui trabalhada gira em torno de um potencial de relevo que transcende as aplicações costumeiramente associadas à *blockchain* e que pode alçar a descentralização via tecnologia como um pilar da transição energética.

2. BLOCKCHAIN E TRANSIÇÃO ENERGÉTICA: COMPREENSÃO PRELIMINAR

O estabelecimento e a manutenção das instituições parte da escolha feita enquanto sociedade desde a delegação pactuada ao soberano. A ordem social convencionada (Rousseau, 1757) e a organização que rechaça o conflito generalizado e abraça a garantia da sobrevivência (Hobbes, 1983) dependem, em uma primeira análise, da figura do Estado que toma para si essas funções de forma centralizada, adquirindo ele o poder e a legitimidade para governar.

É importante notar, entretanto, que, na visão hobbesiana, a obrigação dos indivíduos para com o soberano mantém-se enquanto durar o poder mediante o qual o Estado é capaz de protegê-los

(Hobbes, 1983, p. 73)⁹. Nesse aspecto, a emergência climática posta traz consigo a urgência de se pensar a efetividade da atuação estatal enquanto ato isolado, bem como estabelece a necessidade de inserir novos elementos de governança constituinte em que se vislumbram novas formas institucionais voltadas à construção e preservação dos bens comuns à humanidade (Negri e Hardt, p. 370).

O uso de novas tecnologias no contexto da promoção da autonomia e da proteção dos povos originários é um forte exemplo. Em grande medida, a descentralização permitida por ferramentas que lançam mão do georreferenciamento e do monitoramento servem, antes de tudo, à autodeterminação dos povos e à defesa de seus territórios contra a exploração predatória.

Com mais de dez anos de existência o Sistema de Observação e Monitoramento da Amazônia Indígena (SOMAI)¹⁰¹¹ já foi reconhecido pelo Ministério do Meio Ambiente e Mudança Climática como ferramenta de adaptação à crise ambiental no Plano Nacional de Adaptação às Mudanças Climáticas¹² (IPAM, 2024). Além dele, chama-se a atenção para o aplicativo ACI¹³, que, desenvolvido pelo

⁹ Nas palavras de Hobbes, “entende-se que a obrigação dos súditos para com o soberano dura enquanto, e apenas enquanto, dura também o poder mediante o qual ele é capaz de protegê-los. Porque o direito que por natureza os homens têm de defender-se a si mesmos não pode ser abandonado através de pacto algum. A soberania é a alma do Estado, e uma vez separada do corpo os membros deixam de receber dela seu movimento. O fim da obediência é a proteção, e seja onde for que um homem a veja, quer em sua própria espada quer na de um outro, a natureza manda que a ela obedeça e se esforce por conservá-la” (Hobbes, 1983, p.76).

¹⁰ Trata-se de uma plataforma de acesso livre desenvolvida pelo IPAM em parceria com organizações indígenas como a Coordenação das Organizações Indígenas da Amazônia Brasileira (Coiab). Ela funciona como uma verdadeira biblioteca de dados geográficos e científicos para que pessoas indígenas insiram, pesquisem e analisem informações sobre seus territórios (IPAM, 2022).

¹¹ Por meio de uma equipe científica, o SOMAI divulga informações sobre ameaças antrópicas e climáticas para a Amazônia Indígena, que apoiam os povos indígenas no enfrentamento da mudança do clima (SOMAI, 2025).

¹² Segundo o Instituto de Pesquisa Ambiental da Amazônia (IPAM), “a ferramenta SOMAI já acumula 729 usuários, é usada por mais de 182 organizações indígenas e já monitorou 60,9 milhões de hectares de Terras Indígenas”. Apontam que, com a sua integração com o aplicativo ACI (Alerta Clima Indígena), “o SOMAI registrou centenas de alertas climáticos, ameaças antrópicas e uso tradicional dos territórios, auxiliando em processos judiciais de proteção de Terras Indígenas” (IPAM, 2024).

¹³ No ACI é possível registrar alertas de atividades que violam o território, como o desmatamento, garimpo, queimadas, pesca e caça ilegal. Esses alertas criados no ACI

IPAM em parceria com o Conselho Indígena de Roraima, Instituto Raoni e COCALITIA, possibilita que usuários que vivem em terras indígenas criem seus próprios alertas para proteger os territórios contra possíveis ameaças (IPAM, 2022).

Nesse contexto, fala-se em lançar o olhar para as soluções de mercado existentes, de modo a depositar a esperança em inovações na gestão da crise climática. Ao apontarem para a inadequação da atuação da democracia liberal no plano corrente, Dietz *et al* (2023, p. 697 e 706) contrapõem o Estado face às soluções de mercado/atores privados. A ideia trabalhada pelos autores vem no sentido de que as sociedades empresárias poderiam desenvolver formas mais eficientes e sustentáveis de produção e meios tecnologicamente mais avançados que contribuam para a transição energética.

A tecnologia *blockchain* parece cumprir exatamente esse papel, especialmente devido à sua capacidade de registrar informações de forma descentralizada e segura (Botão et al, 2022, p. 3). Trata-se de uma série de caixas a prova de adulteração, que tem como fundamento outras três tecnologias — redes ponto a ponto¹⁴, criptografia de chave assimétrica¹⁵ e mecanismo de consenso¹⁶ —, criando, assim, uma base de dados altamente resistente à adulteração onde é armazenada uma variedade de transações de forma pseudoanônima (De Filippi e Wright, 2018, p.1-2).

registram coordenadas, fotos e áudios para agilizar a coleta e o compartilhamento das informações (IPAM, 2022).

¹⁴ Segundo a IBM em sua IBM Cloud Education, “na arquitetura P2P, dois ou mais computadores são conectados como “peers”, o que significa que têm poderes e privilégios iguais na rede. Uma rede P2P não requer um servidor central para coordenação. Em vez disso, cada computador na rede atua como um cliente (um computador que precisa acessar um serviço) e um servidor (um computador que atende às necessidades desse cliente). Cada peer disponibiliza alguns de seus recursos para a rede, compartilhando armazenamento, memória, largura de banda e capacidade de processamento”.

¹⁵ Segundo a IBM em sua VMware Solutions, trata-se de método de criptografia que utiliza um par de chaves, público e privado, para a criptografia e decriptografia dos dados, utilizadas primariamente para proteger dados em movimento. Ambas as chaves estão relacionadas uma com a outra e são criadas ao mesmo tempo.

¹⁶ Segundo a IBM, o consenso é um processo no qual “os participantes em um blockchain concordam com uma transação e a validam por meio da rede de peer. Consenso assegura que os livros-razão compartilhados são cópias exatas e diminui o risco de transações fraudulentas, uma vez que a violação teria que ocorrer em muitos lugares ao mesmo tempo”

Criada em 2008, por Satoshi Nakamoto, como tecnologia viabilizadora da criptomoeda *Bitcoin*, a *blockchain* transcende e se expande em outros segmentos apresentando um importante potencial para registrar transações de quaisquer naturezas. Com efeito, a *Bitcoin* é a primeira e mais destacada aplicação baseada em *blockchain*, mas ambas não se confundem, de modo que esta última pode ser enquadrada como uma tecnologia de propósito geral, com características peculiares que a tornam capaz de gerar impacto em outras searas (Brasil, 2020)¹⁷.

Na ocasião do acórdão nº 1.613/2020, o Tribunal de Contas da União apontou o uso da *blockchain* para a consecução dos registros públicos, identidade digital¹⁸, saúde e assistência médica¹⁹, gestão de convênios e programas sociais²⁰, comércio exterior²¹, tokenização de moeda nacional fiduciária²², tributação²³ e combate à fraude e à corrupção²⁴ (Brasil, 2020). A *blockchain* permite, ademais, desde a

¹⁷ Em 2020, o plenário do Tribunal de Contas da União (TCU), por meio do acórdão nº 1.613/2020, realizou um levantamento abrangendo a conceituação da tecnologia blockchain, as suas possíveis áreas de aplicação e os seus desafios no âmbito governamental.

¹⁸ A blockchain é utilizada para registros públicos, identidade digital e compartilhamento de informações entre órgãos públicos. Isso inclui a criação de identidades digitais para cidadãos, permitindo acesso facilitado a informações por autoridades dentro das políticas de segurança (Brasil, 2020, p. 15, 20 e 28).

¹⁹ No setor da saúde, a natureza distribuída dos dados na blockchain permite que prontuários eletrônicos sejam disponibilizados de forma segura, transparente e acessível (Brasil, 2020, p. 15 e 20).

²⁰ A tecnologia possibilita a tokenização de recursos financeiros, que podem ser repassados pelo poder público a outros entes e acompanhados de forma adequada, garantindo a correta aplicação (Brasil, 2020, p. 15 e 20).

²¹ A blockchain também é aplicada no comércio exterior para rastreabilidade e eficiência (Brasil, 2020, p. 15).

²² Trata-se do processo de converter uma moeda emitida por um governo em um ativo digital representado por um token em uma plataforma de tecnologia blockchain. Esses tokens mantêm paridade com a moeda original e são utilizados para facilitar transações digitais mais céleres, seguras e transparentes, sem alteração do valor legal da moeda.

²³ A tecnologia blockchain pode aumentar a transparência nas transações financeiras e comerciais, facilitando o monitoramento, auditoria e tributação, o que ajuda a reduzir a sonegação de impostos (Brasil, 2020, p. 19 e 29).

²⁴ A utilização de blockchain é considerada um controle preventivo e detectivo contra fraude e corrupção, pois cria trilhas de auditoria para rastrear operações governamentais, favorecendo a abertura de dados e reduzindo oportunidades de delitos (Brasil, 2020, p. 28 e 29).

viabilização de moedas digitais, contratos inteligentes²⁵, organizações autônomas descentralizadas e novas formas de governança (Frajhof e Mulholland, 2019).

Segundo Frajhof e Mulholland, a *lex cryptographia* é representativa de uma verdadeira mudança de paradigma para o direito, onde a regulação do comportamento se dá por meio do código de computador, de forma distribuída e autoexecutável, prescindindo de uma autoridade central (Frajhof e Mulholland, 2019).

A utilização da *blockchain* ganha singular relevo quando associada às iniciativas afetas à transição energética, especialmente quando se tem em mente a premência da utilização de energias renováveis como solar, eólica, hidroelétrica, geotérmica e biomassa que oferecem soluções sustentáveis²⁶.

Em que pese as soluções renováveis, há, ainda, desafios que as permeiam como a intermitência das fontes energéticas, altos custos de instalação, bem como o armazenamento e a integração às redes elétricas inteligentes (Iranmanesh et al, 2024, p.2). A tecnologia *blockchain* é chamada nesse cenário para que seja possível uma solução inovadora, confiável e transparente.

O potencial transformador dessa tecnologia no setor de energia renovável vem sendo reconhecida pela sua capacidade de melhora na eficiência energética, por permitir transações descentralizadas e por garantir a transparência dessas transações.

Nesse cenário, a *blockchain* permite a gestão eficiente de oferta e demanda, assim como viabiliza o rastreo e a verificação de fontes de energia verde. Além disso, a tecnologia reduz custos administrativos e

²⁵ Trata-se de contrato redigido em linha de código que independe de uma força humana para começar a ser executado. Por utilizar a tecnologia blockchain, ele é autoexecutável.

²⁶ Segundo a Agência Internacional de Energia, os investimentos em energia limpa aumentaram 40% desde 2020, evidenciando um forte compromisso com a redução das emissões e a promoção da segurança energética (IEA, 2023).

demais complexidades ao automatizar as operações via *smart contracts*²⁷ (Abdella e Shuaib, 2018, p. 15).

Aponta-se, ainda, para a influência da *blockchain* no desenvolvimento de plataformas de comércio *peer-to-peer*²⁸, que têm como função a comercialização direta do excesso de energia renovável entre indivíduos e empresas, passando ao largo dos intermediários tradicionais de energia, além de oportunizar uma maior economia para os consumidores (Iranmanesh et al, 2024, p. 3).

Nesse cenário, chama-se a atenção para iniciativas como a *Brooklyn Microgrid* enquanto rede que conecta pessoas na cidade de Nova York que possuem painéis solares (“proconsumidores”) com pessoas que desejam comprar energia solar local (“consumidores”). Esse mercado local de energia é acessado por meio de um aplicativo móvel²⁹ e gerenciado por *smart contracts* que rodam a partir da tecnologia *blockchain*. Para além de ser uma maneira segura e transparente de transacionar energia limpa, o projeto representa apoio à economia local e fomenta a redução de emissões de gases de efeito estufa (BMG, 2025).

Ademais, a convergência entre energia renovável e a *blockchain* pode criar uma série de oportunidades para que organizações resolvam desafios energéticos em áreas rurais. Exemplo disso é o modelo indiano DApp, desenvolvido a partir da ideia de uma aplicação distribuída de comércio de energia que conecta painéis solares por meio de dispositivos de internet das coisas (IoT)³⁰. O DApp cria um

²⁷ Abdella e Shuaib trazem que os contratos inteligentes são programas de computador que permanecem de forma segura no blockchain e executam automaticamente os termos de um contrato. Segundo os autores, estes contratos permitem que duas ou mais pessoas realizem uma transação comercial de forma anônima, sendo as informações ali inseridas imutáveis e, portanto, impassíveis de adulteração (Abdella e Shuaib, 2018, p. 15).

²⁸ Energia Peer-to-Peer (P2P) é um sistema descentralizado onde indivíduos e empresas podem comprar e vender eletricidade diretamente uns aos outros.

²⁹ No aplicativo, as pessoas podem optar por comprar créditos de energia solar local. Os “prosumidores” vendem seu excedente de energia solar para o mercado, onde os consumidores adquirem a energia disponível por meio de leilão.

³⁰ As leituras dos dispositivos IoT conectados aos painéis solares são armazenadas na blockchain, e os contratos inteligentes realizam transações conforme a energia consumida pelos usuários finais.

sistema transparente, seguro e descentralizado para geração e consumo de energia, bem como para a alocação de créditos de carbono, com o objetivo de levar eletricidade a residências rurais remotas e incentivar investimentos verdes. (Larshmi e Thiyagarajan, 2021).

Com efeito, o uso da *blockchain* na indústria energética se destaca por viabilizar práticas sustentáveis e iniciativas de economia circular³¹. Nesse aspecto, Iranmanesh *et al* chamam a atenção para o fato da tecnologia permitir transações seguras e eficientes para o abastecimento e sua cobrança quando se trata de veículos elétricos, de modo a facilitar o crescimento do mercado para esse tipo de meio de transporte. Adicionalmente, a tecnologia promove a democratização da energia e permite a pequenos produtores de energia renovável acesso direto ao mercado energético, o que, ao fim e ao cabo, contribui para um cenário energético mais diversificado e equitativo (Iranmanesh et al, 2024, p. 3).

Ademais, a *blockchain* tem o potencial de auxiliar na implementação de mecanismos de resposta à demanda. Em outros dizeres, ela ajuda a reduzir ou a deslocar o uso da energia durante os períodos de pico, fomentando, assim, um maior equilíbrio da rede e um aumento de sua eficiência. Nessa mesma toada, vê-se que a tecnologia *blockchain* também desempenha um importante papel na medição inteligente e na gestão da rede elétrica (Iranmanesh et al, 2024, p. 3).

No âmbito da emissão de certificados verdes e do comércio de carbono, a *blockchain* garante a sua autenticidade e a sua rastreabilidade. O mercado de carbono vem como uma das estratégias para fomento da agenda climática de mitigação de emissões de gases de efeito estufa (GEE). Ao atribuir um valor econômico criam-se

³¹ Trata-se de um modelo econômico que busca pôr termo ao desperdício e ao uso contínuo de recursos naturais. Ela promove o reaproveitamento, a reparação, a reutilização e a reciclagem de produtos e materiais, sendo, assim, um contraponto ao modelo linear de “extrair-usar-descartar” (Parlamento Europeu, 2024).

sistemas para comercializar os créditos de carbono³², cotas³³ e permissões³⁴ de modo que os atores globais se sintam incentivados ao engajamento voluntário³⁵ ou como parte do cumprimento de políticas de regulamentação da emissão desses gases³⁶ (IPAM Amazônia, 2025).

Startups brasileiras já se atentaram a essa potencialidade, especialmente com o advento da Lei nº 15.042/2024, que instituiu o Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões de Gases de Efeito Estufa. Sociedades empresárias como a Green Ledger e KlimaDAO³⁷ têm utilizado a *blockchain* como instrumento no contexto do mercado de carbono. A ideia é estabelecida a partir do monitoramento contínuo de emissões via dispositivos de internet das coisas (IoT)³⁸, com dados validados pela *blockchain*, de modo a garantir a segurança, transparência e rastreabilidade do processo inventário de geração de gases de efeito estufa e, via de consequência, da comercialização do crédito de carbono³⁹.

³² Trata-se de reduções de emissões de GEE negociáveis no mercado internacional de carbono, medidos em toneladas evitadas de carbono equivalente (tCO₂e) (art. 2º, VII, Lei 15.042/2024).

³³ Trata-se do limite máximo de CO₂ que uma empresa pode emitir dentro de um sistema regulado.

³⁴ É a autorização negociável que permite a emissão de uma tonelada de CO₂ usada em sistemas de comércio.

³⁵ O mercado voluntário de carbono depende da livre iniciativa de redução das emissões de GEE. Nele indivíduos e empresas podem realizar a sua compensação por meio da aquisição de créditos de carbono gerados por projetos e iniciativas de redução ou remoção de gases de efeito estufa.

³⁶ O mercado regulado de carbono é caracterizado pela atuação no contexto de um sistema estruturado e obrigatório - Sistema de Comércio de Emissões - ETS - também chamado de *cap and trade*, onde são estabelecidas cotas de emissão ou permissões.

³⁷ Mais informações disponíveis em <https://greenledger.com.br/> e <https://www.klimadao.finance/>

³⁸ Internet das Coisas (IoT) refere-se a uma rede de dispositivos físicos, veículos, eletrodomésticos e outros objetos materiais que possuem sensores, software e conectividade de rede incorporados, permitindo que colem e compartilhem dados (IBM, 2025).

³⁹ A geração de créditos de carbono é feita via emissão de *tokens*, onde cada *token* representa uma tonelada de emissão de CO₂. Por meio do monitoramento contínuo dessas emissões via dispositivos e Internet das Coisas (IoT) aliado à validação de dados via *blockchain*, contempla-se o cálculo, o gerenciamento e a comercialização de créditos de carbono de forma certificada, transparente e confiável.

Vale destacar não somente os seus usos, mas também o seu impacto em termos de valor de mercado no setor de energia. Em 2019, esse valor chegou a \$279 milhões, projetando-se um alcance de \$81.205,98 milhões até 2032 (Yahoo!Finance, 2023).

Diante do cenário delineado, e da urgência pelo acesso a ferramentas que promovam a transição energética sob uma perspectiva efetiva, vê-se que o potencial transformador da tecnologia *blockchain* no setor de energia renovável está se tornando cada vez mais evidente, oferecendo soluções inovadoras para o comércio descentralizado de energia, aumentando a eficiência do sistema e promovendo a transparência nas transações. Cabe agora analisar algumas das experiências existentes de forma a ponderar acerca dos desafios traçados para que a *blockchain* não seja apenas uma boa ideia e se torne uma realidade transformadora.

3. A BLOCKCHAIN NO SETOR DE ENERGIA: UMA ANÁLISE DA EXPERIÊNCIA ALEMÃ

Modelos e vivências da utilização da *blockchain* no setor energético têm o poder de lançar luz e qualificar a ponderação acerca do seu impacto efetivo. Além disso, a pragmática aponta acertos, equívocos e desafios, permitindo o planejamento e a correção de rota.

Com esse intuito, elege-se para o presente trabalho a análise de iniciativas no contexto alemão pelo recorte temporal e geográfico da realização do XXII Congresso Geral da Academia Internacional de Direito Comparado, em Berlim, 2026, que, entre os temas delineados, propõe-se a abordar a transição energética (tema 23 - Direito Ambiental), a partir de sua regulamentação até a inovação tecnológica e as tendências do mercado, especialmente quanto aos desafios legais do comércio de energia de ponta a ponta e as aplicações da tecnologia *blockchain* no setor energético.

Segundo dados da Agência Internacional de Energia (IEA)⁴⁰, atualmente, o fornecimento energético⁴¹ alemão é composto por carvão (17,4%), petróleo (34,3%), gás natural (26,4%), nuclear e hídrica (0,8%), biocombustíveis e resíduos (12,7%). Nas últimas duas décadas, a sua matriz energética passou por uma transformação significativa, impulsionada pela *Energiewende*⁴², ou transição energética.

O país tem se afastado dos combustíveis fósseis e da energia nuclear, direcionando-se para fontes de energia renovável, especialmente a eólica e a solar. Essa mudança resultou em um aumento expressivo da participação das renováveis na geração de eletricidade, enquanto o uso de carvão, petróleo e gás natural diminuiu.

Hodiernamente, no contexto da União Europeia (UE), a Alemanha é responsável por 23,7% das emissões líquidas de gases de efeito estufa, já tendo reduzido essas emissões em 30,7% entre 2005 e 2023⁴³. Nesse aspecto, destaca-se a Lei Alemã de Mudança do Clima que estabelece a obrigação de reduzir as emissões de GEE em 65% — em relação aos níveis de 1990 — até 2030 e alcançar a neutralidade de GEE até 2045.

A Alemanha caminha, ainda, por meio do projeto de atualização do seu Plano Nacional de Energia e Clima (PNEC), submetido em

⁴⁰ A IEA é uma autoridade energética global, fundada em 1974, e com sede em Paris. Ela fornece dados, análises e soluções sobre combustíveis e todas as tecnologias. O intuito de seu funcionamento é auxiliar governos, indústria e cidadãos a tomarem boas decisões energéticas.

⁴¹ O fornecimento total de energia inclui toda a energia produzida em um país ou importada por ele, subtraída daquela que é exportada ou armazenada. Ele representa toda a energia necessária para suprir os usuários finais no país. Algumas dessas fontes de energia são utilizadas diretamente, enquanto a maioria é transformada em combustíveis ou eletricidade para o consumo final.

⁴² Embora o termo *Energiewende* seja amplamente utilizado no discurso político e em documentos oficiais, sua incorporação jurídica está distribuída por várias legislações, entre as quais se destacam: a Lei de Proteção Climática (Klimaschutzgesetz – KSG); a Lei das Fontes de Energia Renovável (Erneuerbare-Energien-Gesetz – EEG); a Lei de Eficiência Energética (EnEfG – 2023); a Lei de Eliminação do Carvão (Kohleausstiegsgesetz); e a política de Eliminação da Energia Nuclear (Atomausstieg).

⁴³ A média de redução da UE é de 30,5%.

novembro de 2023, com versão final atualizada em agosto de 2024. O plano de recuperação e resiliência alemão está voltado principalmente para a transição verde, com forte ênfase nos setores de edifícios e transporte, nos quais o país enfrenta dificuldades para cumprir suas metas setoriais.

É de notar, ademais, que o país impõe obrigações às empresas para a redução de sua pegada de carbono, especialmente por meio da Lei de Eficiência Energética (EnEfG) (2023) e da Diretiva de Relatórios de Sustentabilidade Corporativa (CSRD) (2022). Essas normas exigem que as empresas implementem medidas de economia de energia, relatem seu impacto ambiental e alinhem seus modelos de negócio com as metas climáticas.

Nesse contexto, o país vem lançando mão da inovação tecnológica como uma das ferramentas de transição energética, das quais se destaca a comercialização de energia *peer-to-peer* (P2P) via aplicação da *blockchain* no setor.

O comércio de energia P2P é um modelo de negócio baseado em uma plataforma interconectada que funciona como um mercado online, no qual consumidores e produtores se conectam para comercializar energia diretamente, sem a necessidade de um intermediário (Irena, 2020, p.6). Trata-se, portanto, de uma plataforma que permite que geradores locais de energia distribuída vendam sua eletricidade pelo preço desejado a consumidores dispostos a pagar esse valor. Essas transações são rastreadas de forma segura e transparente com o auxílio de tecnologias de registro distribuído, sendo o tipo mais proeminente a *blockchain* (Irena, 2020, p. 14).

Essa tecnologia viabiliza a comunicação e a coordenação descentralizadas, criando infraestrutura para conexões seguras, econômicas e rápidas entre pares, sem intermediários centralizados. A criptografia assegura a integridade e a privacidade dos dados, enquanto o mecanismo de consenso permite validar transações *peer-*

to-peer com mais segurança, melhor gestão de dados e maior cooperação entre os participantes (Irena, 2019, p. 6).

O cenário da utilização da *blockchain* não só vem ganhando espaço, como merece um olhar atento de compromisso com o futuro. Das 189 *startups* de energia que usam a *blockchain* como ferramenta identificadas, mais de 46% estão concentradas na Europa. Os Países Baixos, os Estados Unidos e a Alemanha se destacam pela maior concentração dessas iniciativas (B2B, 2018 e SolarPlaza, 2018).

Na Alemanha, chama a atenção a plataforma de energia *Lumenaza* que possibilita o compartilhamento de energia P2P e a formação de comunidades energéticas em níveis local, regional e nacional. A *startup* conecta produtores de eletricidade a consumidores, controla a demanda e a oferta (por exemplo, por meio do carregamento de baterias) e inclui gestão de grupos de balanceamento, agregação, faturamento e visualização dos fluxos de energia (Lumenaza, 2020).

Pode-se apontar, ainda, a sociedade empresária *Conjoule*, que oferece uma plataforma baseada em *blockchain* desenvolvida para apoiar o comércio P2P de energia entre proprietários de sistemas fotovoltaicos instalados em telhados e compradores interessados do setor público ou corporativo. Também *startup Sonnen*, que usa uma rede de baterias solares residenciais disponibilizada para ajudar a lidar com as limitações associadas à capacidade de transmissão da energia eólica. Nesta iniciativa, a tecnologia *blockchain* fornece ao operador uma visão do conjunto disponível de flexibilidade, pronto para ser ativado com o toque de um botão, após o que o *blockchain* registra a contribuição das baterias (Irena, 2019, p. 18).

Têm-se, ainda, as sociedades empresárias como a *Ponton* e a *E.ON*, que operam a *Enerchain*, uma plataforma de comércio atacadista de eletricidade baseada em *blockchain*, e a iniciativa *TenneT*, que desenvolve um sistema baseado em *blockchain* de modo

a integrar baterias residenciais e carregamento de veículos elétricos (Irena, 2019, p. 19 e 22).

Na administração pública direta alemã, há um projeto-piloto, encabeçado pelo Ministério da Economia e Energia, de uma plataforma descentralizada e integrada em larga escala para infraestrutura de geração, transmissão e distribuição de energia renovável (Irena, 2019, p. 19).

Os exemplos trazidos ilustram um cenário de uso e aceitação do caminho que se começa a trilhar na Alemanha no uso da tecnologia *blockchain* como ferramenta que tem o potencial de reduzir os custos da rede por meio de um melhor balanceamento, redução dos custos de medição, tornando os fluxos de informação mais rápidos e imediatos, e agregando valor ao cliente por meio de informações mais detalhadas e transparentes sobre a origem e a evolução da energia (Dena, 2016, p. 25).

De acordo com a pesquisa realizada pela Agência de Energia alemã e consolidada no documento intitulado “Blockchain in the energy transition. A survey among decision-makers in the German energy industry”⁴⁴, os segmentos de mercado da cadeia de valor da eletricidade, especialmente os de compra e comercialização, poderão de fato se beneficiar das aplicações da *blockchain*. Essas implicações vão desde o aumento da eficiência das plataformas de negociação, a implementação de contratos inteligentes e o apoio à gestão de resposta à demanda e de usinas virtuais (Dena, 2016, p. 24).

O cenário que promete, entretanto, tem que ser analisado não só a partir das lentes do esperar, mas também desde a perspectiva crítica dos pontos cegos e dos desafios postos, seja pela própria natureza da *blockchain*, seja por elementos de regulação de mercado. É o que se passa a observar.

⁴⁴ Em livre tradução “Blockchain na transição energética: uma pesquisa entre tomadores de decisão da indústria de energia alemã”.

4. DESAFIOS DA IMPLEMENTAÇÃO DA *BLOCKCHAIN* NA TRANSIÇÃO ENERGÉTICA

A aplicação da *blockchain*, seja no seu destino primeiro para a criptomoeda *Bitcoin*, seja para os usos posteriores que se fizeram dela, não ocorre sem pontos de atenção. Sem qualquer pretensão de esgotamento dos desafios existentes e futuros, aqui se vislumbram alguns desses pontos, especialmente sob a perspectiva do uso dessa tecnologia no contexto da transição energética.

O primeiro entrave percebido diz respeito à sustentabilidade ecológica da *blockchain*: o seu funcionamento demanda um gasto energético grande dado o uso intensivo de processamento de dados para a validação das transações. Em 2020, estima-se que a mineração do *Bitcoin* consumiu o equivalente a aproximadamente 0,6% do consumo mundial de eletricidade⁴⁵ (Krause *et al.*, 2020), o que acende um contraditório alerta: se se propõe a instrumentalização dessa tecnologia no contexto da transição energética, não pode ela ensejar relevante gasto energético, caso contrário a *blockchain* deixaria de ser um possível elemento de impacto positivo e passaria a se tornar parte do problema.

As soluções hoje pensadas para que se reduza o gasto energético na mineração da *blockchain* passa pela adoção aqui também de fontes de energia renovável — como a solar e a eólica —, além da otimização dos algoritmos de mineração de modo a reduzir a carga de processamento de dados, bem como a utilização de sistemas de refrigeração mais eficientes com vistas a mitigar o consumo de energia no resfriamento dos equipamentos desse garimpo eletrônico (Botão *et al.*, 2022, p. 3 e 4).

Ainda, identifica-se que é possível revisitar o mecanismo de consenso — que estrutura a tecnologia *blockchain* — para que seja

⁴⁵ Cerca de 121,36 TWh (terawatt-hora) de energia.

mais eficiente em termos energéticos. Na sua origem, esse mecanismo ocorre via *proof-of-work (PoW)*⁴⁶, modelo seguro, mas que consome uma grande quantidade de energia. A alternativa mais eficiente nesse recorte seria o modelo *proof-of-stake (PoS)*⁴⁷, que oferece uma redução substancial de gasto energético quando comparado ao uso isolado do PoW: acima de 75% de redução de consumo (Chan et al, 2020, p.7).

Nesse aspecto, chama a atenção que a rede *blockchain* Ethereum se atualizou com o objetivo de migrar do modelo baseado em PoW para o modelo PoS, o que pode significar um importante passo para a sustentabilidade ecológica dessa tecnologia descentralizada (Botão et al, 2022, p. 5). Curioso notar, ainda, que por volta de 50% dos projetos de transição energética que utilizam a *blockchain* identificados vem lançando mão da *blockchain* Ethereum (Irena, 2019, p. 16), o que sinaliza uma via de solução para o desafio apontado.

Para além da sua pegada ambiental, chama-se a atenção para obstáculos na implementação prática da *blockchain* em sistemas de energia do mundo real, incluindo redes inteligentes. Entre eles estão os desafios regulatórios significativos que dificultam sua implementação prática e a sua adoção em larga escala (Iranmanesh et al, 2024, p 19).

Com efeito, a integração da tecnologia *blockchain* no setor de energia, especialmente em redes descentralizadas de energia

⁴⁶ Satoshi Nakamoto propôs em seu *white paper* um mecanismo de prova de trabalho (proof-of-work - POW) para resolver o problema do consenso. Entretanto, o POW exige que os *nodes*, enquanto computadores conectados, compitam para resolver um quebra cabeça matemático, estando a probabilidade de sucesso fortemente atrelada ao poder computacional, que, via de consequência, funda-se em um maior e crescente gasto de energia (Chan et al, 2020, p.1).

⁴⁷ Este modelo propõe-se a substituir o PoW para fornecer consenso e segurança sem estar atrelado ao poder de processamento do *hardware* usado na mineração. Nele, a seleção do validador das transações ocorre de forma aleatória com base na quantidade de criptomoeda que o candidato a validador possui. Em outros dizeres, e ressalvadas as críticas existentes quanto a esse modelo, o *proof-of-stake (PoS)* pode reduzir a dificuldade de mineração de cada *node* e acelerar o processo de mineração com base na proporção e no tempo de posse das moedas de cada um deles (Botão et al, 2022, p. 3) (Chan et al, 2020, p.2).

renovável, enfrenta desafios regulatórios que precisam ser superados para permitir sua adoção sustentável e em larga escala. O primeiro deles surge na ausência de regulamentações globais que permitam a sua operação e adoção integrada, abrindo-se a terreno para que as regras de implementação possam variar significativamente entre diferentes setores e regiões (Barceló et al, 2023, p. 7).

É, portanto, premente a existência de controle regulatório e de padrões a fim de estabelecer protocolos sustentáveis e uniformes de troca de informações nas redes elétricas, além da promoção de letramento prévio das entidades reguladoras quanto às implicações e aplicabilidades dos modelos baseados em *blockchain* (Barceló et al, 2023, p. 20).

Adicionalmente, a descentralização do mercado de energia exige o estabelecimento de normas de regulação e tributação⁴⁸, bem como padrões de estabelecimento de preços e incentivos⁴⁹ (Barceló et al, 2023, p. 20). É necessário, ainda, ponderar acerca dos marcos regulatórios que tratem da cibersegurança e da integridade dos dados nesse contexto, uma vez que a estabilidade de um sistema energético é ponto crucial, devendo ele funcionar sem complicações intrínsecas e estar protegido de interferências externas. Imprescindível, portanto, normativas robustas que tratem do enfrentamento de ameaças cibernéticas⁵⁰ e da garantia da confiança e da transparência⁵¹ (Barceló et al, 2023, p. 20 e 24).

⁴⁸ A descentralização do mercado de energia exige o estabelecimento de normas rigorosas para regular o mercado e a tributação dos lucros gerados.

⁴⁹ Para promover o desenvolvimento de mercados integrados de microgeração de energia, o preço da energia precisa ser ajustável em tempo real. Isso inclui a redução dos preços durante períodos de geração excedente e o aumento durante períodos de alta demanda ou escassez energética, criando, assim, incentivos financeiros.

⁵⁰ Os ataques podem ocorrer desde o nível físico do hardware até os sistemas de software, sendo um risco significativo a inserção de dados falsos ou o controle indevido da rede elétrica.

⁵¹ São necessárias regulamentações que assegurem transparência e equidade nas transações energéticas baseadas em *blockchain*, uma vez que a ausência de regras claras pode permitir que agentes fraudulentos explorem tecnologias inteligentes. Espera-se que as tecnologias blockchain ofereçam acesso público e confirmação de registros de transações, tanto para grandes agências governamentais quanto para pequenos produtores-consumidores.

Outro ponto de atenção está nos desafios tecnológicos à implementação da *blockchain* no mercado de energia. Diferentemente das transações de *Bitcoins*, no setor sob estudo, a entrega da eletricidade ocorre por meios físicos, de modo que um mercado de energia baseado em *blockchain* precisa refletir as configurações físicas das redes elétricas.

Nesse sentido, a Agência Alemã de Energia já entende que se o sistema atender a micro redes isoladas e a sistemas fechados de transmissão de energia, como parques comerciais ou comunidades energéticas autônomas com poucas interconexões externas, a *blockchain* pode se tornar o modelo predominante. Entretanto, segue a Agência, à medida que começa a interagir com sistemas de distribuição de transmissão operados por concessionárias, irá se deparar com a necessidade de superação de obstáculos semelhantes aos enfrentados por provedores de usinas ou empresas que oferecem serviços de resposta à demanda (Dena, 2016, p. 25).

Diante desse cenário, têm-se que a aplicação dessa tecnologia apresenta um duplo potencial: ao mesmo tempo em que oferece instrumentos valiosos para a descentralização e democratização do acesso à energia, enfrenta importantes desafios de ordem ambiental, tecnológica e regulatória. A mitigação de seu elevado consumo energético, por meio da adoção de mecanismos mais eficientes como o *proof-of-stake* e do uso de fontes renováveis, constitui passo essencial para sua sustentabilidade ecológica. No entanto, sua plena integração em redes elétricas reais depende da criação de marcos regulatórios claros, uniformes e seguros, capazes de garantir interoperabilidade, cibersegurança e estabilidade sistêmica.

5. CONCLUSÃO

O patrimônio comum da humanidade — aqui tratado na emergência de um olhar atento e criativo ao meio ambiente —, leva à

análise do uso da tecnologia *blockchain*, seja no contexto do comércio de energia ponta a ponta, seja na sua utilização no mercado de carbono. A experiência alemã ensina e problematiza, desaguardando em desafios comuns para que esse salto de fé possa ser compreendido também a partir da sua aplicação prática.

O potencial transformador da tecnologia *blockchain* no setor de energia renovável torna-se cada vez mais evidente, oferecendo soluções inovadoras para o comércio descentralizado de energia, aprimorando a eficiência do sistema e promovendo a transparência e a segurança nas transações.

O futuro da *blockchain* na transição energética depende em grande medida do equilíbrio entre inovação tecnológica e governança regulatória eficaz, que se perfaz por meio da pesquisa responsável e da adoção de políticas públicas corajosas.

Data de Submissão: 29/10/2025

Data de Aprovação: 02/12/2025

Processo de Avaliação: *double blind peer review*

Editora Geral: Hirdan Katarina de Medeiros Costa

Editor Convidado: Fernando Joaquim Ferreira Maia

Editora Convidada: Marilda Rosado de Sá Ribeiro

Assistente Editorial: Kyvia Celine Chevalley

REFERÊNCIAS

ABDELLA, Juhar; SHUAIB, Khaled. Peer to peer distributed energy trading in smart grids: a survey, **Energies**, 11, 2018. Disponível em <https://doi.org/10.3390/en11061560> Acesso em 7 out 2025.

AGORA ENERGIEWENDE. **Is Germany a net importer or net exporter of electricity?** Disponível em <https://www.agora-energiewende.org/about-us/the-german-energiewende/is-germany-a-net-importer-or-net-exporter-of-electricity#:~:text=Is%20Germany%20a%20net%20importer%20or%20net%20exporter%20of%20electricity,based%20on%20renewable%20energy%20sources>. Acesso em 8 out 2025.

AGORA ENERGIEWENDE. **The Liberalisation of Electricity Markets in Germany**. History, Development and Current Status. Study. Dezembro, 2019. Disponível em chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/https://www.agora-energiewende.org/fileadmin/Projekte/2019/Liberalisation_Power_Market/Liberalisation_Electricity_Markets_Germany_V1-0.pdf#:~:text=In%201996%2C%20Germany%20became%20one%20of%20the,integrated%20with%20most%20neighbouring%20markets%20in%20Europe. Acesso em 8 out 2025.

AGORA ENERGIEWENDE. **What are Germany's nuclear, coal and fossil gas phase-out strategies**. Disponível em <https://www.agora-energiewende.org/about-us/the-german-energiewende/what-are-germanys-nuclear-coal-and-fossil-gas-phase-out-strategies#:~:text=What%20are%20Germany's%20nuclear%2C%20coal,with%20cleaner%20alternatives%20by%202045>. Acesso em 8 out 2025.

BARCELÓ, Ernest; BRKIC, Vesna Spasojevic; DIMIC-MISIC, Katarina; GANE, Patrick; HUMMEL, Michael; IMANI, Monir. Regulatory Paradigm and Challenge for Blockchain Integration of Decentralized Systems: Example - Renewable Energy Grids. **Sustainability**. Volume 15, 2023.

BOTÃO, Rodrigo Pereira; COSTA, Hirdan Katarina de Medeiros; SANTOS, Edmilson Moutinho dos. Blockchain e eficiência energética: o modelo de PoS na atualização “the merge” da rede Ethereum. *In: Encontro de Pesquisa em Energia – EVEx*, 2022.

BRASIL. Lei n. 15.042, de 11 de dezembro de 2024. Institui o Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SBCE); altera as Leis n. 12.187, de 29 de dezembro de 2009, 12.651, de 25 de maio de 2012, 6.385, de 7 de dezembro de 1976, e 6.015, de

31 de dezembro de 1973. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, Seção 1, p. 4, 12 dez. 2024.

BRASIL. Tribunal de Contas da União (TCU). Acórdão nº 1613/2020 – Plenário. Relator: Ministro Aroldo Cedraz. Sessão realizada em 24 de junho de 2020. Levantamento sobre usos da tecnologia blockchain e Distributed Ledger Technology (DLT) no setor público, riscos, fatores críticos de sucesso e desafios para o controle. Brasília: TCU, 2020. Disponível em: <https://pesquisa.apps.tcu.gov.br/documento/acordao-completo/1613/2020/>. Acesso em: 6 out. 2025.

BMG. **Brooklyn Microgrid Overview**. Disponível em <https://www.brooklyn.energy/about> Acesso em 17 nov. 2025

B2B. Blockchain & Energy Company Guide, Blockchain2Business, 2018. Disponível em www.blockchain2business.eu/request-blockchain-company-guide/ Acesso em 17 out 2025.

CHAN, Wai Kin (Victor); ZHANG, Rong. Evaluation of Energy Consumption in Block-Chains with Proof of Work and Proof of Stake. **Journal of Physics: Conference Series**, 2020.

CIDH, Caso Habitantes de La Oroya vs. Peru. Exceções preliminares, mérito, reparações e custas. Sentença de 27 de novembro de 2023. Série C, No 511.

CIDH. Caso Pueblos Indígenas U'wa y sus miembros vs. Colombia, Excepción Preliminar, Fondo, Reparaciones y Costas. Sentencia de 4 de julio de 2024. Serie C No. 530

CIDH. Opinião Consultiva OC-23/17 de 15 de novembro de 2017. Série A No 23.

CIDH. Opinião Consultiva OC - 32/25 de 29 de maio de 2025. Série A No32.

DE FILIPPI, Primavera; WRIGHT, Aaron. Blockchain and the Law: The rule of Code. Massachusetts: **Harvard University Press**, 2018.

DENA. German Energy Agency. Blockchain in the energy transition. A survey among decision-makers in the German energy industry. Berlin, 2016.

DIETZ, T., FUCHS, D., SCHÄFER, A. et al. Introduction: Mapping the Research Field on the Democracy-Sustainability Nexus. **Polit Vierteljahresschr** **64**, 695-714 (2023).

<https://doi.org/10.1007/s11615-023-00511-0>

EUI. Florence School of Regulation. P2P Energy Trading: Legal Challenges for Data Management and Data Protection. April 2021. Disponível em <https://fsr.eui.eu/p2p-energy-trading-legal-challenges-for-data-management-and-data-protection/> Acesso em 8 out 2025.

EUROPEAN COMMISSION. Update of the integrated national energy and climate plan. Disponível em <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://commission.europa.eu/system/files/2023-11/GERMANY-%20DRAFT%20UPDATED%20NECP%202021-2030%20EN.pdf#:~:text=The%20REPowerEU%20plan%20allows%20for%20an%20exemption,relationships%20that%20increasingly%20rely%20on%20renewable%20energy>. Acesso em 8 out 2025.

EUROPEAN PARLIAMENT. Roadmap to EU climate neutrality – Scrutiny of Member States. Disponível em [chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2024/767182/EPRS_BRI\(2024\)767182_EN.pdf](chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2024/767182/EPRS_BRI(2024)767182_EN.pdf) Acesso em 8 out 2025.

EUROPEAN UNION COUNCIL. Corporate Sustainability Reporting Directive (CSRD)

FRAJHOF, Isabela. MULHOLLAND, Caitlin Sampaio. Aplicações e Impactos da Tecnologia Blockchain no Direito. Palestra. 2019 PUC Rio. Disponível em <https://ecoa.puc-rio.br/aplicacoes-e-impactos-da-tecnologia-blockchain-no-direito> Acesso em 3 out 2025.

GERMANY. Bebauungsplan (Development Plan). Disponível em https://www.stadtplanungsamt-frankfurt.de/legal_zoning_plans_5328.html?langfront=en&psid=7r8l6m3lkbhj585a9bogovs94 Acesso em 8 out 2025.

GERMANY. Energy Efficiency Act (EnEfG). Disponível em <https://www.gesetze-im-internet.de/enefg/BJNR1350B0023.html> Acesso em 8 out 2025.

GERMANY. Energy Industry Act (EnWG). Disponível em <https://www.bundeswirtschaftsministerium.de/Redaktion/DE/Gesetze/Energie/EnWG.html> Acesso em 8 out 2025.

GERMANY. Federal Ministry for Economic Affairs and Energy. The digitisation of the energy transition. Disponível em <https://www.bundeswirtschaftsministerium.de/Redaktion/EN/Artikel/Energie/digitisation-of-the-energy-transition.html#:~:text=Introduction&text=The%20Act%20on%20t>

he%20Digitisation,the%20strictest%20rules%20in%20Europe.
Acesso em 8 ago 2025.

GERMANY. FNP (Flächennutzungsplan) (Regional Plan). Disponível em <https://www.region-frankfurt.de/Unsere-Themen-Leistungen/Regionaler-Fl%C3%A4chennutzungsplan/> Acesso em 8 out 2025.

GERMANY. Federal Ministry for Economic Affairs and Energy. Disponível em <https://www.bundeswirtschaftsministerium.de/Navigation/EN/Home/home.html> Acesso em 8 ago 2025.

GERMANY. Federal Ministry for Economic Affairs and Energy. An Electricity Market for Germany's Energy Transition. Discussion Paper of the Federal Ministry for Economic Affairs and Energy (Green Paper). October, 2014 Disponível chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/https://www.bundeswirtschaftsministerium.de/Redaktion/EN/Publikationen/gruenbuch.pdf?__blob=publicationFile&v=1 Acesso em 8 ago 2025.

GREEN LEDGER. Disponível em <https://greenledger.com.br/> Acesso em 7 de out 2025.

GUSTIN, Miracy Barbosa de Sousa; DIAS, Maria Tereza Fonseca. (Re)pensando a pesquisa jurídica: teoria e prática. 3 ed. ver. e atual. Belo Horizonte: Del Rey, 2010.

HAGERGROUP. The energy system of the future: Peer-to-Peer energy trading. Disponível em <https://hagergroup.com/en/blog/energy-management/energy-system-future> Acesso em 8 out 2025.

HOBBS, Thomas. Leviatã. Matéria, forma e poder de um Estado eclesiástico e civil. (Tradução de João Paulo Monteiro e Maria Beatriz Nizza da Silva). 3. Ed. São Paulo: **Abril Cultural**, 1983. Col. Os Pensadores.

KRAUSE, M., FEUERRIEGEL, S., & NEUMANN, D. Blockchain Mining Energy Consumption and Its Challenges: A Review of Current and Future Solutions. **Energies**, 13(7), 1587, 2020.

LAKSHMI, Gnana; THIYAGARAJAN, Gomathi. Decentralized energy to power rural homes through smart contracts and carbon credit. 7th International Conference on Electrical Energy Systems (ICEES). IEEE, Chennai, India, 2021.

IBM. IBM Cloud. Termos do glossário para IBM Cloud. Disponível

em <https://cloud.ibm.com/docs/overview?topic=overview-glossary&locale=pt-BR> Acesso em 3 de out de 2025.

IBM. What is the Internet of Things (IoT)? Disponível em <https://www.ibm.com/think/topics/internet-of-things#:~:text=future%20of%20IoT-,What%20is%20the%20IoT?,This%20can%20include>: Acesso em 8 out 2025.

IEA. International Energy Agency. Disponível em <http://www.iea.org> Acesso em 8 de out 2025.

IRANMANESH, Mohammad; REJEB, Abderahman; REJEB, Karim; SULE, Edit; ZRELLI, Imen. Blockchain technology in the renewable energy sector: A co-word analysis of academic discourse. **Heliyon** 10, 2024.

IRENA. International Renewable Energy Agency. Blockchain. **Innovation Landscape Brief**. Abu Dhabi, 2019.

IRENA. International Renewable Energy Agency. Peer-to-Peers Electricity trading. **Innovation Landscape Brief**. Abu Dhabi, 2020.

KLIMADAO, Disponível em <https://www.klimadao.finance/> Acesso em 7 de out 2025.

LANG, Matthias. Blockchain and Smart Contracts in the Energy Industry: A European Perspective. Bird and Bird. Disponível em <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.twobirds.com/-/media/pdfs/blockchain-and-smart-contracts-in-the-energy-industry--article.pdf> Acesso em 8 out 2025.

LUMENAZA. The software for the energy revolution. 2020. Disponível em www.lumenaza.de/en Acesso em 17 out 2025.

NAKAMOTO, Satoshi. Bitcoin: a peer to peer electronic cash system. 2008. Disponível em <https://bitcoin.org/bitcoin.pdf>. Acesso em 3 out 2025.

NEGRI, A; HARDT, M. Commonwealth. Paperback. **Harvard University Press**, 2011. 434p.

NOERR. Crypto Tokens and Tokenisation - BaFin Publishes Summary of Guidelines for Regulatory Classification. 28.98/2019. Disponível em <https://www.noerr.com/en/insights/krypto-token-und-tokenisierung> Acesso em 8 out 2025.

INTERNATIONAL COURT OF JUSTICE. Obligations of States in Respect of Climate Change. Advisory Opinion. 23 July 2025.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA), in: Executive Summary – World Energy Outlook 2023 – Analysis, IEA, 2023. Disponível em <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023/executive-summary>. Acesso em 3 out 2025.

IPAM Amazônia. Instituto de Pesquisa Ambiental da Amazônia. Disponível em https://ipam.org.br/cartilhas-ipam/o-que-e-e-como-funciona-o-mercado-de-carbono/?gad_source=1&gad_campaignid=22457792620&gbraid=0AAAApwpXMoVccOe9YbEnv5IDcHgUNfB3&gclid=CjwKCAjw1dLD BhBoEiwAQNRiQZst9ewmcWShce3WJouLqeAEGMzcv-T1cyPk_RFPOgEQRXseotnEhoC6nUQAvD_BwE#. Acesso em 8 out 2025.

IPAM Amazônia. Instituto de Pesquisa Ambiental da Amazônia. Jovens indígenas reforçam uso de tecnologia na gestão territorial. Disponível em <https://ipam.org.br/jovens-indigenas-participam-de-curso-sobre-monitoramento-territorial/>. Acesso em 17 nov. 2025

IPAM Amazônia. Instituto de Pesquisa Ambiental da Amazônia. SOMAI, ferramenta de monitoramento indígena, celebra 10 anos. 2024. Disponível em <http://ipam.org.br/somai-celebra-dez-anos-em-evento-no-dia-17-em-brasilia/>. Acesso em 17 nov. 2025.

PARLAMENTO EUROPEU. Economia circular: definição, importância e benefícios. 2024. Disponível em <https://www.europarl.europa.eu/topics/pt/article/20151201STO05603/economia-circular-definicao-importancia-e-beneficios#:~:text=A%20economia%20circular%20%C3%A9%20um,a%20compr%C3%A1%20dos%20outra%20vez>. Acesso em 7 out 2025.

ROCHA, Raphael Vieira da Fonseca; RANGEL, Fernando López; SILVA, Iandra Rezende. Obrigação Erga Omnes e o Acervo Decisório da Corte Internacional de Justiça em Matéria Ambiental: aplicando o direito internacional na proteção do meio ambiente. **Revista Brasileira de Direito Internacional**. v. 10, n. 2. Florianópolis: 2025. DOI: 10.26668/IndexLawJournals/2526-0219/2024.v10i2.10955.

ROUSSEAU, Jean Jacques. O contrato social. In: Oeuvres complètes, tome III. **Collection “Pléiade”**. Paris: Gallimard, 1757.

SANTOS, Boaventura de Souza. Uma concepção multicultural de direitos humanos. **Lua Nova: Revista de Cultura e Política**, São Paulo, n. 39, p. 107-124, 1997. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ln/a/gVYtTs3QQ33f63sjRR8ZDgp/?lang=pt>. Acesso em 1º out 2025

SOLARPLAZA. Comprehensive Guide to Companies involved in Blockchain & Energy, 2018.

SOMAI. Disponível em <https://plataforma.somai.org.br/> Acesso em 17 nov. 2025.

PERROTA, Raquel Pinto Coelho. O papel do Estado na adoção de tecnologias descentralizadas no contexto da proteção ao meio ambiente. Avaliação apresentada à disciplina Princípios de Direito. PPGD/UERJ. Área de concentração: Cidadania, Estado e Globalização. Linha de pesquisa Direito Internacional, 2025.

YAHOO!FINANCE. Emergen Research, in: Blockchain in Energy Market Size Worth USD 81,205.98 Million in 2032, Yahoo Finance, 2023. Disponível em <https://finance.yahoo.com/news/blockchain-energy-market-size-worth-160000445.html> . Acesso em 7 out 2025.

Energy transition and blockchain: decentralization as a tool

Raquel Pinto Coelho Perrota

Raphael Vieira da Fonseca Rocha

Abstract: This article analyzes the role of blockchain technology as a tool to support the global energy transition, particularly within the context of environmental governance and technological innovation. Grounded in the notion of the environment as the common heritage of humankind and recent decisions by the Inter-American Court of Human Rights and the International Court of Justice recognizing the right to a healthy environment, the study discusses the need for decentralized solutions to address the climate crisis. It examines blockchain's potential to enable decentralized energy trading, ensure the traceability of green certificates, and enhance transparency in carbon markets, with emphasis on experiences in Germany, a leading country in applying this technology to the energy sector. The article also identifies environmental, technological, and regulatory challenges to its adoption, such as high energy consumption, lack of regulatory standardization, and cybersecurity concerns. It concludes that blockchain holds transformative potential for promoting efficiency, democratization, and sustainability in the energy sector, provided it is supported by effective public policies and robust regulatory frameworks.

Keywords: Energy transition; Environment; Climate crisis; Blockchain; Decentralization.

DOI: <https://doi.org/10.22478/ufpb.1678-2593.2025v24n57.76778>

Contend sob license *Creative Commons*: Attribution-Noncommercial-Nonderivative 4.0 International (CC BY-NC-ND 4.0)

