

ARLEI COSTA JUNIOR

**A DIGITALIZAÇÃO DO SETOR ELÉTRICO BRASILEIRO UTILIZANDO
BLOCKCHAIN E A MELHORIA DA QUALIDADE DAS POLÍTICAS PÚBLICAS,
TECNOLÓGICAS E COMERCIAIS PARA O USO DE ENERGIA RENOVÁVEL**

Tese apresentada ao curso de Doutorado em Direito do Programa de Pós-graduação da Pontifícia Universidade Católica do Paraná (PUCPR), como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor em Direito.

Área de concentração: Direito Econômico e Desenvolvimento, Direito Comparado.

Orientador: Prof. Dr. Luiz Alberto Blanchet.

CURITIBA

2022

Dados da Catalogação na Publicação
Pontifícia Universidade Católica do Paraná
Sistema Integrado de Bibliotecas – SIBI/PUCPR
Biblioteca Central
Edilene de Oliveira dos Santos CRB/9 1636

C837d
2022
Costa Junior, Arlei
A digitalização do setor elétrico brasileiro utilizando blockchain e a melhoria da qualidade das políticas públicas tecnológicas e comerciais para o uso de energia renovável / Arlei Costa Junior ; orientador: Luiz Alberto Blanchet. -- 2022
159 f. ; 30 cm

Tese (doutorado) – Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Curitiba, 2022
Bibliografia: f. 151-159

1. Direito econômico. 2. Blockchains (Base de dados). 3. Desenvolvimento econômico. 4. Energia – Fontes alternativas. 5. Energia elétrica – Comercialização.
I. Blanchet, Luiz Alberto. II. Pontifícia Universidade Católica do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Direito. III. Título.

Doris 3. ed. – 341.378

ARLEI COSTA JUNIOR

**A DIGITALIZAÇÃO DO SETOR ELÉTRICO BRASILEIRO UTILIZANDO
BLOCKCHAIN E A MELHORIA DA QUALIDADE DAS POLÍTICAS PÚBLICAS,
TECNOLÓGICAS E COMERCIAIS PARA O USO DE ENERGIA RENOVÁVEL**

Tese apresentada ao curso de Doutorado em Direito do Programa de Pós-graduação da Pontifícia Universidade Católica do Paraná (PUCPR), como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor em Direito.

Área de concentração: Direito Econômico e Desenvolvimento, Direito Comparado.

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. Dr. Luiz Alberto Blanchet – Orientador (PUCPR)

Prof^ª. Dr^a. (PUCPR)

Prof^ª. Dr^a. (UFPR)

Prof. Dr.

Prof. Dr.

Curitiba, 10 de abril de 2022.

À minha esposa Itajana e aos meus filhos Júlia e Pedro Henrique,
pelo apoio incondicional.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Arlei Costa e Edna Peron Costa, que foram imprescindíveis para toda a minha formação, sempre me apoiando e acreditando em mim.

À minha esposa Itajana Barreto Costa e aos meus filhos, Júlia Barreto Costa e Pedro Henrique Barreto Costa por terem me acompanhado nessa jornada, dividindo o marido e pai com muitos livros e pesquisas, sempre apoiando e ajudando.

Ao querido professor, Doutor Luiz Alberto Blanchet, orientador exemplar, por todos os ensinamentos compartilhados para a realização deste trabalho. Agradeço por toda a paciência, compreensão e incentivo nos momentos difíceis desta caminhada.

A todos os professores do Programa de Pós-Graduação em Direito da PUC-PR, com carinho especial aos professores André Parmo Foloni, Antônio Carlos Efig, Cinthia O. de Almendra Freitas, Daniel Wunder Hachem, Danielle Pamplona, Eduardo Oliveira Agostinho, Emerson Gabardo, Katya Kozicki, Luís Alexandre Carta Winter, Marcia Carla Pereira Ribeiro, Oksandro Osdival Gonçalves, e Vladimir Passos de Freitas pelos conhecimentos adquiridos nas disciplinas que cursei, nas participações nos grupos de pesquisa e eventos realizados, que enriqueceram meus conhecimentos e certamente modificaram conceitos e valores em minha vida.

Ao excelente Programa de Pós-Graduação da PUC-PR, por meio de seus funcionários e professores, pela excelência e condução acadêmica exemplar, em especial à Eva Curelo, cuja convivência aprazível deixará sempre boas lembranças.

Aos colegas que se tornaram grandes amigos, por todo o carinho e atenção recebidos.

“A ciência se compõe de erros que, por sua vez, são os passos até a verdade.”

Julio Verne

RESUMO

A energia elétrica é elemento estratégico e essencial para o desenvolvimento do estado e seu crescimento econômico e social, assumindo tal relevância que a ciência do direito busca estudar e regular sua geração, transmissão e consumo. Esta tese visa validar ou falsear a hipótese de que a digitalização do setor elétrico utilizando a tecnologia *blockchain* permite uma melhoria no resultado das políticas públicas para investimentos privados em microgeração e no mercado de consumo de energias renováveis distribuídas. A matriz energética brasileira, ao contrário da matriz mundial, utiliza amplamente energia renovável através das hidrelétricas, e as fontes eólica e solar estão crescendo rapidamente utilizando a geração distribuída, que foi recentemente regulamentada pela Lei Federal n. 14.300/2022, denominada Marco Legal da Geração Distribuída. As políticas públicas propostas nessa lei possibilitam que o processo de digitalização, descentralização e descarbonização do setor elétrico ganhem uma dinâmica maior, possibilitando investimentos privados pelo cidadão comum, com perspectiva de benefícios econômicos e sociais. A utilização de possivelmente milhões de recursos energéticos distribuídos pelo território brasileiro demandará um controle automatizado da geração e do consumo, especialmente pela intermitência característica da energia renovável distribuída, que precisará de informações geradas e transmitidas em tempo real para os algoritmos para esse controle ser eficiente. A tecnologia *blockchain* tem características muito favoráveis para realizar o registro e transmissão dos dados oriundos da digitalização das informações do setor elétrico brasileiro, de forma a se desenvolver um sistema descentralizado de registro e transmissão dessas informações utilizando uma rede *blockchain* voltada para o setor elétrico. A proposta dessa pesquisa foi a análise dos benefícios da utilização da tecnologia *blockchain* para a digitalização do setor elétrico brasileiro, de forma a validar ou não a sua adequação para essa finalidade. Para tanto, se buscou primeiramente a entender a legislação sobre a geração distribuída e os tipos de informação e registros necessários para objetivos por ela almejados, bem como o tipo de infraestrutura para que essa informação seja transmitida na velocidade necessária para a operação física do sistema elétrico e para a movimentação econômica da energia negociada. Nesse sentido a tecnologia *blockchain* e as estratégias de consenso distribuído demonstram vantagens significativas se comparadas ao sistema centralizado de armazenamento, tais como maior segurança, escalabilidade e transparência, úteis para uma variedade de aplicações e casos de uso. A descentralização propiciada por estas tecnologias permite a redução dos custos introduzidos por intermediários, a obtenção de transações mais rápidas e seguras, procedimentos automatizados de liberação, maior resiliência a falhas, a rastreabilidade das transações, a necessidade de cumprir a transparência e a regulamentação e a eliminação da necessidade de um intermediário confiável. Considerando a multiplicidade de atores envolvidos, incluindo o poder público, grandes corporações e até mesmo o pequeno prosumidor, é necessário a utilização de gestão e controles inteligentes, atividades desafiadoras em um sistema elétrico crescente e cada vez mais descentralizado, complexo e multiagentes, convergindo assim com as possibilidades e recursos da tecnologia *blockchain* e viabilizando investimentos em novos produtos e serviços que sugerem promover a evolução do setor elétrico de forma sustentável e com desenvolvimento econômico e social.

Palavras-chave: *Blockchain*. Tokenização. Desenvolvimento Econômico. Certificado de Energia Renovável. Comercialização de Energia Ponto a Ponto (P2P).

ABSTRACT

Electricity is a strategic and essential element for the development of the state and its economic and social growth, assuming such relevance that the science of law seeks to study and regulate its generation, transmission and consumption. This thesis aims to validate or falsify the hypothesis that the digitalization of the electricity sector using blockchain technology allows an improvement in the outcome of public policies for private investments in microgeneration and in the distributed renewable energy consumption market. The Brazilian energy matrix, unlike the global matrix, largely uses renewable energy through hydroelectric plants, and wind and solar sources are growing rapidly using distributed generation, recently regulated by federal law 14,300/2022, called the Legal Framework of Distributed Generation. The public policies proposed in this law allow the process of digitalization, decentralization, and decarbonization of the electricity sector to gain greater momentum, enabling private investments by ordinary citizens, with the prospect of economic and social benefits. The use of possibly millions of energy resources distributed throughout the Brazilian territory will require an automated control of generation and consumption, mainly due to the characteristic intermittence of distributed renewable energy, which will require information generated and transmitted in real-time to the algorithms for this control to be efficient. Blockchain technology has very favorable characteristics to carry out the registration and transmission of data from the digitization of information from the Brazilian electricity sector, to develop a decentralized system for recording and transmitting this information using a blockchain network aimed at the electricity sector. The purpose of this research was to analyze the benefits of using blockchain technology for the digitalization of the Brazilian electricity sector, to validate or not its suitability for this purpose. Therefore, we first sought to understand the legislation on distributed generation and the types of information and records needed for the purposes for which it is proposed, as well as the type of infrastructure so that this information is transmitted at the speed necessary for the physical operation of the electrical system and for the economic movement of commercialized energy. In this sense, blockchain technology and distributed consensus strategies demonstrate significant advantages compared to the centralized storage system, such as greater security, scalability and transparency, useful for a variety of applications and use cases. The decentralization provided by these technologies allows for the reduction of costs introduced by intermediaries, faster and safer transactions, automated clearance procedures, greater resilience to failures, traceability of transactions, the need to comply with transparency and regulation and the elimination of the need for an intermediary reliable. Considering the multiplicity of actors involved, including public authorities, large corporations and even the small prosumer, it is necessary to use intelligent management and controls, challenging activities in a growing electrical system, increasingly decentralized, complex and multi-agent, thus converging with the possibilities and resources of blockchain technology and enabling investments in new products and services that suggest promoting the evolution of the electricity sector in a sustainable way and with economic and social development.

Keywords: Blockchain. Tokenization. Economic Development. Renewable Energy Certificate. Peer-to-Peer Energy Trading (P2P).

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Matriz Elétrica Mundial em 2019.....	18
Figura 2 - Geração de energia elétrica no mundo por fonte.	19
Figura 3 - Matriz Elétrica Brasileira em 2020.....	20
Figura 4 - Matriz Elétrica Brasileira e a Mundial em 2020.....	21
Figura 5 - Geração de energia elétrica no Brasil por fonte.....	22
Figura 6 - Ilustração de uma Usina Hidrelétrica Reversível (UHR).	26
Figura 7 - Configuração do SIN referente ao ano de 2015.....	39
Figura 8 - Criação de blocos em uma <i>blockchain</i>	101
Quadro 1 - Lei n. 14.300/2022: principais mudanças do Marco Legal da GD.	56

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

1RI	Primeira Revolução Industrial
2D	Duas Dimensões
2RI	Segunda Revolução Industrial
3D	Três Dimensões
3RI	Terceira Revolução Industrial
4D	Quatro Dimensões
4RI	Quarta Revolução Industrial
AILIRA	<i>Artificially Intelligent Legal Information Research Assistant</i> (Assistente de pesquisa de informações jurídicas usando IA)
ABRAPCH	Associação Brasileira de PCHs e CGHs
ABRADEE	Associação Brasileira de Distribuidores de Energia Elétrica
ACD	Ambiente de Contratação Distribuída
ACL	Ambiente de Contratação Livre
ACR	Ambiente de Contratação Regulada
Aneel	Agência Nacional de Energia Elétrica
CBIE	Centro Brasileiro de InfraEstrutura
CCEE	Câmara de Comercialização de Energia Elétrica
CCER	Contrato de Compra de Energia Regulada
CCC	Conta de Consumo de Combustíveis
CCT	<i>Clean Coal Technologies</i> (Tecnologias Livres de Carvão)
CDE	Conta de Desenvolvimento Energético
CEL	Certificado de Energia Limpa
CNPE	Conselho Nacional de Política Energética
CUSD	Contrato de Uso do Sistema de Distribuição
CVM	Comissão de Valores Mobiliários
CEO	<i>Chief Executive Officer</i> (Diretor executivo ou diretor-geral)
CGH	Centrais Geradoras Hidrelétricas
CO2	Dióxido de Carbono
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
DNAEE	Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica
DOU	Diário Oficial da União
EBC	<i>Energy Blockchain Consortium</i>
EUA	Estados Unidos da América
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
EWf	<i>Energy Web Foundation</i>
EWT	<i>Energy Web Token</i>
FER	Fontes de Energia Renovável
FIP	Fundos de Investimento em Participação

FiTs	<i>Feed-in Tariffs</i>
GEAP	<i>Global Environment Asset Platform</i>
GD	Geração Distribuída
GOs	Garantias de Origem
GWh	Gigawatt-hora
H2O	Água
IBICT	Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia
ICMS	Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços
IDH	Índice de Desenvolvimento Humano
IEA	<i>International Energy Agency</i>
IA	Inteligência Artificial
IoT	<i>Internet of Things</i> (Internet das Coisas)
IRECs	<i>International Renewable Energy Certificate</i> (Certificados internacionais de energia renovável)
KWh	Quilowatt-hora
KV	Quilovolt
KVA	Quilovolt ampere (Potência aparente)
LCOE	Custo Nivelado de Energia
M2M	Máquina à Máquina
MWh	Megawatt-hora
O2	Molécula de Oxigênio
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
ONU	Organização das Nações Unidas
NOS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
P2P	Pessoa à Pessoa
PCHs	Pequenas Centrais Hidrelétricas
PDE	Plano Decenal de Expansão de Energia
PEC	Proposta de Emenda Constitucional
PEE	Programa de Eficiência Energética
PERS	Programa de Energia Renovável Social
PIB	Produto Interno Bruto
PNUD	Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento
PoA	<i>Proof of Authority</i> (Prova de Autoridade)
PoS	<i>Proof of Stake</i> (Prova de Participação)
PoW	Proof of Work (Prova de Trabalho)
PPC	PIB per capita
PROINFA	Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica
RA	Realidade Aumentada
RAP	Receita Anual Permitida
REC	<i>Renewable Energy Certificate</i> (Certificado de energia renovável)
RED	Recursos Energéticos Distribuídos

REIDI	Regime Especial de Incentivos para o Desenvolvimento da Infraestrutura
REN	Resolução Normativa
RPC	Renda per capita
SEBRAE	Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas
SCEE	Sistema de Compensação de Energia Elétrica
SDK	<i>Software Development Kit</i>
SIN	Sistema Interligado Nacional
TPS	Transações Por Segundo
TUSD	Tarifas de Uso do Sistema de Distribuição
TUST	Tarifas de Uso do Sistema de Transmissão
TWh	Terawatt-hora
UC	Unidade Consumidora
UHR	Usinas Hidrelétricas Reversíveis
VPP	<i>Virtual Power Plant</i>
W	Watt
WAIF	<i>Well-being as informational foundation</i> (Bem-estar com base informacional)
WBA	<i>World Bioenergy Association</i> (Associação Mundial de Bioenergia)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
2 SISTEMAS DE GERAÇÃO, TRANSMISSÃO E DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ...	17
2.1 TECNOLOGIAS DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA	17
2.1.1 Matriz elétrica mundial.....	17
2.1.2 Matriz elétrica brasileira	20
2.1.3 Energia hidráulica ou hidrelétrica.....	23
2.1.4 Biomassa.....	27
2.1.5 Eólica	28
2.1.6 Gás natural.....	29
2.1.7 Carvão e derivados	30
2.1.8 Energia nuclear.....	32
2.1.9 Energia solar	34
2.1.10 Petróleo e derivados	35
2.2 SISTEMAS DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA	37
2.2.1 Configuração.....	37
2.2.2 Tarifas de Uso do Sistema de Transmissão (TUST).....	41
2.3 SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA	42
2.3.1 Configuração.....	42
2.3.2 Regulação da distribuição de energia elétrica.....	44
2.3.3 Tarifa de Uso do Sistema de Distribuição (TUSD).....	46
2.4 EVOLUÇÃO TECNOLÓGICA DO SETOR ELÉTRICO.....	47
3 REGULAÇÃO BRASILEIRA DO SETOR ELÉTRICO.....	49
3.1 GERAÇÃO DISTRIBUÍDA	49
3.2 LEI N. 14.300/2022 – MARCO LEGAL DA MICROGERAÇÃO E MINIGERAÇÃO DISTRIBUÍDA.....	53
3.2.1 Direito adquirido	57
3.2.2 Valoração dos créditos compensatórios.....	58
3.2.3 Compensação das componentes tarifárias	60
3.2.4 Demanda das usinas	61
3.2.5 Custo de disponibilidade.....	62
3.2.6 Geração compartilhada.....	63
3.2.7 Potência máxima.....	65
3.2.8 Titularidade.....	67
3.2.9 Distribuição de créditos	68
3.2.10 Troca de titularidade.....	69
3.2.11 Garantia de fiel cumprimento	70
3.2.12 B optante.....	71
3.2.13 Prazo para cadastro	72

3.2.14 Programa para GD em baixa renda	73
3.2.15 Comercialização de energia	74
3.2.16 Atributos ambientais	75
3.2.17 Prazo para cumprimento das disposições	76
4 A DIGITALIZAÇÃO DO SETOR ELÉTRICO	77
4.1 REGISTRO DAS INFORMAÇÕES DIGITALIZADAS	82
4.1.1 Armazenamento centralizado das informações	84
4.1.2 Armazenamento descentralizado das informações	85
4.2 USO DA TECNOLOGIA <i>BLOCKCHAIN</i> NO SETOR ELÉTRICO	86
4.3 A TOKENIZAÇÃO DA ENERGIA	90
4.3.1 Tecnologia <i>blockchain</i>	93
4.3.2 <i>Bitcoin e Ethereum</i>	97
4.3.3 Modelos de consenso da <i>blockchain</i>	102
4.3.4 <i>Blockchain</i> pública e privada	109
4.3.5 Adequação da <i>blockchain</i> ao setor elétrico.....	110
5 APLICAÇÕES DA TOKENIZAÇÃO DO SETOR ELÉTRICO.....	114
5.1 POSSIBILIDADES DE UTILIZAÇÃO DA <i>BLOCKCHAIN</i> NO SETOR ELÉTRICO .	116
5.2 <i>TOKENIZAÇÃO E BLOCKCHAINS</i> VOLTADOS AO SETOR ELÉTRICO.....	118
5.3 RESPOSTA DA DEMANDA	122
5.4 COMERCIALIZAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA	129
5.4.1 Microrredes e transações ponto a ponto (P2P) de energia elétrica.....	129
5.4.2 Comercialização P2P de créditos de energia elétrica oriundos da GD.....	134
5.5 CERTIFICADOS DE ORIGEM DE ENERGIA ELÉTRICA	139
6 CONCLUSÕES.....	145
REFERÊNCIAS	151

1 INTRODUÇÃO

As diversas formas de geração de energia, desde as mais antigas e primitivas até as promessas para o futuro são de grande importância para as pessoas, países e para a economia mundial. Nesse sentido, o Direito busca regular a situação de geração de energia, os impactos sociais e ambientais decorrentes, a tributação pelo exercício da atividade econômica, entre outras importantes normatizações relacionadas ao setor de energia.

Considerando que a energia é elemento estratégico e essencial para o desenvolvimento do Estado e seu crescimento econômico e social, é relevante que a ciência do Direito, em conjunto com as ciências correlatas, tais como a Física, Química, Geologia e Engenharia, busquem criar formas de estimular o investimento nas formas de geração de energia que visem à sustentabilidade e preservação do meio ambiente, promovendo a transição da situação atual da geração de energia para aquela que se mostra a solução ideal em sintonia com estado da arte da geração de energia.

Blanchet¹ explica que “a noção de desenvolvimento inserida no sistema normativo constitucional não pode ser entendida como mero progresso, avanço ou crescimento em todos os aspectos pertinentes aos valores consagrados pela Constituição”, e esclarece que “o desenvolvimento pelo qual aspira a sociedade considera que a cada novo patamar conquistado, este seja mantido como ponto de partida para novos avanços. Os episódios de aparente desenvolvimento que nada fazem senão recuperar patamares pretéritos perdidos em razão de retrocessos”. Por fim, conclui que o desenvolvimento nacional proposto pela Constituição possui um atributo intrínseco necessário, que é “a progressividade com constância”.

Os ajustes no conteúdo jurídico, retroalimentado pelos resultados obtidos e pelos objetivos desejados na geração energética, devem guiar o legislador e os quadros técnicos do poder público, visando à efetividade dos objetivos. Nesse sentido, Gurgel Costa, Braga Junior e Moraes,² fazem a seguinte consideração: “Compete, pois, aos governantes saberem lidar com o desafio do desenvolvimento sustentável, visto que a garantia de direitos sociais passa tanto pelos crescentes investimentos no setor elétrico como pela sadia qualidade de vida

¹ BLANCHET, Luiz Alberto. O serviço público de energia elétrica e o desenvolvimento: a sustentabilidade energética. In: GONÇALVES, Oksandro; FOLLONI, André; SANTANO, Ana Cláudia (Coord.) **Direito econômico & socioambiental: por interconexões entre o desenvolvimento e a sustentabilidade**. Curitiba: Íthala, 2016. p. 57.

² GURGEL COSTA, Victor Hugo; BRAGA JUNIOR, MORAES, Sérgio Alexandre de. **Políticas públicas e sustentabilidade para a universalização do acesso à energia elétrica**. Disponível em: <http://www.publicadireito.com.br/artigos/?cod=dbc1c85e4b057d60>. Acesso em: 12 out. 2016.

decorrente do equilíbrio ecológico constitucionalmente assegurado. As políticas públicas devem atentar simultaneamente a ambos os fatores”.

Assim sendo, a complementaridade dos sistemas de geração de energia é salutar para garantir um fornecimento contínuo no tempo, seja pelas transições diárias como dia e noite, ou verão e inverno, seja por externalidades que possam comprometer ou reduzir a geração. Assim, a segurança no abastecimento de energia está relacionada com a ideia de sistemas complementares de geração, em especial aquelas sustentáveis. Um exemplo seria um sistema de geração eólico produzindo energia durante a noite, enquanto não é possível utilizar os sistemas de geração solar, ou ainda, com a ampliação do uso de energia hidrelétrica no período de inverno, quando pode ser necessário um maior uso de energia para aquecimento, reduzindo-se a geração de energia fora dos momentos de pico de consumo objetivando manter ou recuperar o nível dos reservatórios.

Esse processo de transformação já se iniciou no setor elétrico brasileiro, com base em três valores: descarbonização, descentralização e digitalização. A descarbonização visa à redução das emissões de carbono oriundo da queima dos combustíveis fósseis, que contribui para o aquecimento global e constitui fonte não renovável de energia. A descentralização busca o aumento da autonomia e da participação dos consumidores da energia, que podem de forma ativa investir em infraestrutura para a geração distribuída, armazenamento de energia local em baterias e na resposta da demanda, entre outros. A digitalização passa por conceitos como *Big Data*, internet das coisas, algoritmos e *blockchain*, que buscam pela convergência tecnológica viabilizar soluções de eficiência energética, econômica e sustentabilidade.³

Assim, as técnicas de registro de informações baseadas em sistemas de “livro-razão distribuído” ou *distributed ledger*, que levaram ao desenvolvimento da *blockchain*,⁴ surgem com potencial para tratar com essas transformações, na medida em que possibilitam registros inalteráveis, rastreabilidade e verificação.

O uso dessas informações e registros deve ter grau de sigilo conforme níveis de acesso hierarquizados, para evitar abuso econômico e eventuais vantagens ilícitas que o uso dessas informações poderia trazer. O bom uso dessas informações viabiliza um novo patamar de qualidade nas políticas públicas para o setor elétrico, em função da precisão e visualização em tempo real que essa tecnologia disponibiliza.

³ ESFERAENERGIA. **Os 3Ds de energia:** descarbonização, descentralização e digitalização. Disponível em: <https://esferaenergia.com.br/blog/descarbonizacao-descentralizacao-digitalizacao> Acesso em: 13 nov. 2021.

⁴ MEDIUM. **What's the Difference Between Blockchain & Distributed Ledger Technology?** Disponível em: <https://medium.com/blockchain-review/whats-the-difference-between-blockchain-distributed-ledger-technology-19407f2c2216> Acesso em: 02 nov. 2019.

O registro dos dados e o acesso dessas informações sobre geração e consumo de energia elétrica em tempo real, viabiliza que novos modelos de negócio surjam ou prosperem, dentre os quais esse trabalho vai abordar algumas possibilidades, tais como a resposta da demanda, os certificados de origem de energia e o comércio de energia ponto a ponto entre os prosumidores,⁵ que é aquele que ao mesmo tempo é fornecedor e consumidor de energia elétrica.

Nesse sentido, o trabalho apresenta uma síntese da atual regulação do setor elétrico no Brasil sobre a geração de energia distribuída e suas principais características, objetivando uma melhor compreensão sobre como a digitalização ou *tokenização* poderia ou não contribuir positivamente para o mercado de energia e para as políticas públicas no setor. Em especial, busca validar ou falsear a hipótese da digitalização do setor elétrico utilizando a tecnologia *blockchain* para permitir uma melhoria das políticas públicas, dos investimentos privados em microgeração e no mercado de consumo de energias renováveis distribuídas.

⁵ ISTOÉ. **Prosumidor:** A palavra do futuro – Em breve, você será também. Disponível em: <https://istoe.com.br/prosumidor-a-palavra-do-futuro-em-brevevoce-sera-tambem/> Acesso em: 02 nov. 2019.

2 SISTEMAS DE GERAÇÃO, TRANSMISSÃO E DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA

2.1 TECNOLOGIAS DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

A geração de energia elétrica, até recentemente se dava de forma unidirecional, onde de um lado havia usinas geradoras de energia elétricas acopladas a sistemas de transmissão e distribuição, que transportavam a energia elétrica para as unidades consumidoras, do outro lado.

Esse fluxo unidirecional se justificava pela tecnologia disponível ao tempo em que esse modelo foi elaborado, pois o custo para se investir numa usina de geração de energia era muito elevado, bem como não era tarefa simples injetar energia na rede elétrica, demandando equipamentos dispendiosos. Assim, a construção das usinas de geração de energia elétrica, no Brasil em especial, costumava ser tarefa pensada e custeada pelo Estado, tanto pelo interesse estratégico no desenvolvimento econômico e social, quanto pela capacidade econômica necessária para executar os projetos dessas usinas. Dessa forma, a matriz de geração de energia elétrica é formada pelo conjunto de fontes disponíveis apenas para a geração de energia elétrica em uma região ou país. No Brasil ela se desenvolveu prioritariamente com base em investimento público, aproveitando as características geográficas para a geração hidráulica, solar e eólica, e os insumos como biomassa, gás natural, carvão e petróleo para a geração termoelétrica.

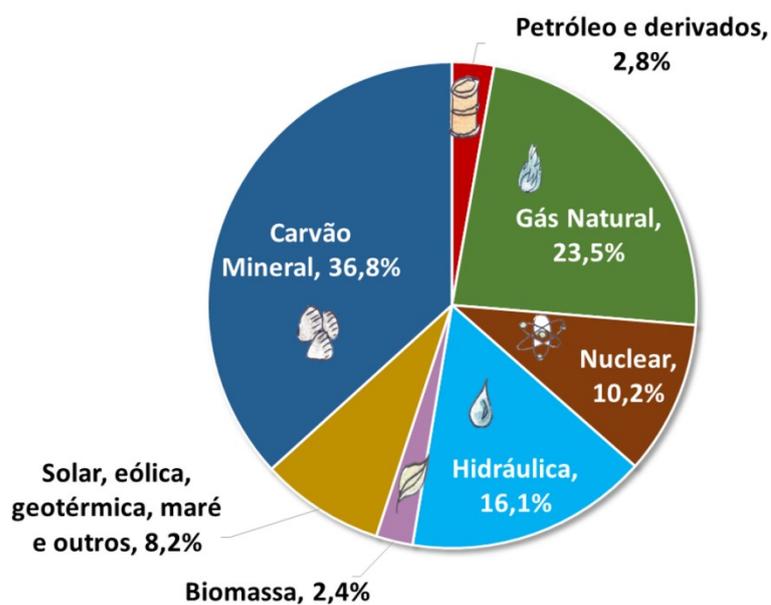
2.2.1 Matriz elétrica mundial

A matriz de geração de energia elétrica no mundo é baseada, principalmente, em combustíveis fósseis como carvão, óleo e gás natural, em termelétricas.⁶

A matriz elétrica mundial atual (Figura 1) ainda é baseada principalmente na queima do carvão mineral com 36,8%, seguida pelo gás natural com 23,5%, que são fontes não renováveis de energia, e apenas na terceira posição vem a geração hidráulica ou hidrelétrica com 16,1%, que é a principal fonte de energia renovável no mundo atualmente. Em seguida na quarta posição vem a energia nuclear com 10,2%, em quinto lugar vem a energia solar, eólica, geotérmica, marés e outros totalizando 8,2%, em sexto lugar o uso de petróleo e derivados com 2,8%, finalizando com a biomassa, a qual corresponde a 2,4%.

⁶ EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Matriz Energética e Elétrica**. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica> Acesso em: 17 fev. 2022.

Figura 1 - Matriz Elétrica Mundial em 2019.



Fonte: EPE.⁷

A dinâmica das fontes de geração de energia nos últimos trinta anos (Figura 2) mostra como algumas dessas fontes eram quase inexistentes no início do ano de 1990, e foram ganhando importância e escala de geração, tais como a geração eólica e a solar fotovoltaica, alcançando a relevância progressiva hoje vista na atual matriz elétrica mundial.

Da análise do quadro evolutivo apresentado na Figura 2, é possível fazer as seguintes inferências, conforme a fonte de geração:

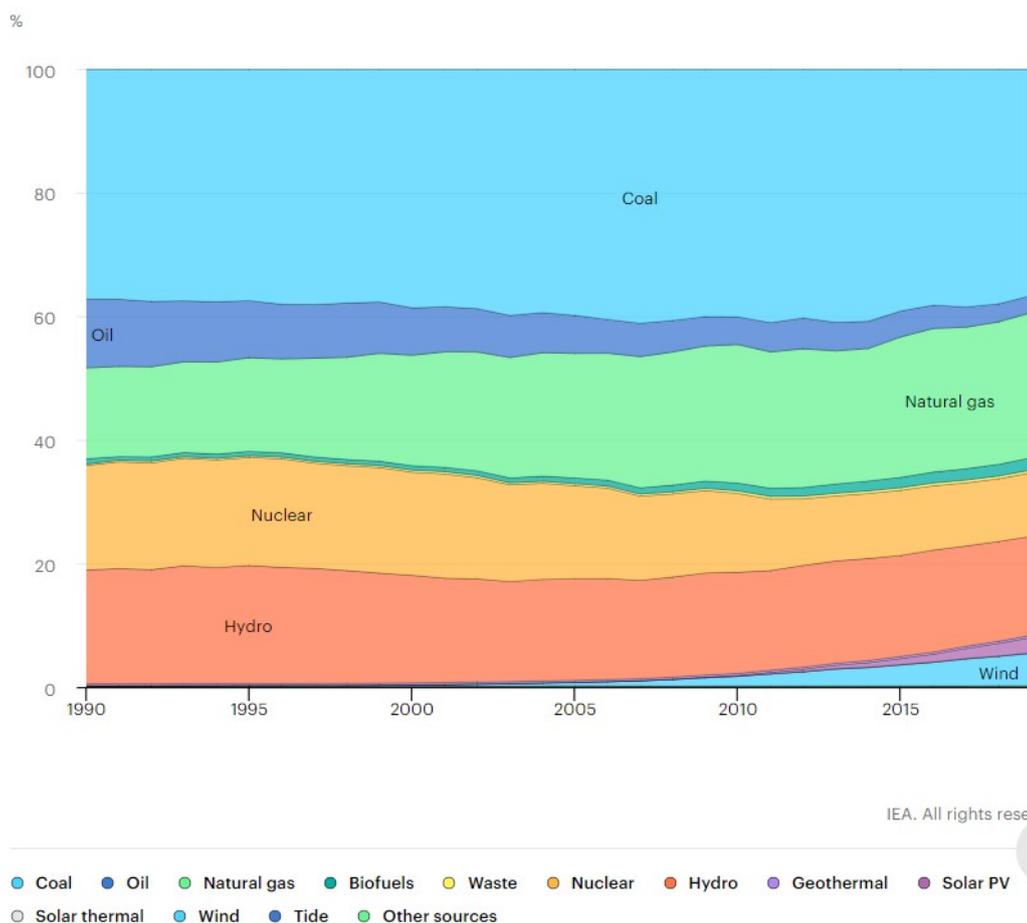
- I) Carvão: teve pequena oscilação do seu percentual na matriz energética mundial, com pequeno aumento até o ano de 2010 e com pequena redução até o ano de 2020.
- II) Gás Natural: vem aumentando continuamente seu percentual na matriz energética mundial.
- III) Hidráulica ou hidrelétrica: manteve seu percentual constante com pequenas oscilações na matriz energética mundial em todo esse período.
- IV) Nuclear: vem reduzindo gradualmente seu percentual na matriz energética mundial.
- V) Eólica, solar, geotérmica e marés: a partir dos anos 2000 começou a ganhar relevância e vêm crescendo expressivamente a partir de 2010.
- VI) Petróleo e derivados: vem reduzindo gradual e significativamente seu percentual na matriz energética mundial desde 1990.

⁷ EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Matriz Energética e Elétrica**. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica> Acesso em: 17 fev. 2022.

VII) Biomassa e biocombustíveis: vem aumentando lentamente seu percentual e relevância na matriz energética mundial.

Figura 2 - Geração de energia elétrica no mundo por fonte.

Electricity generation by source, World 1990-2019



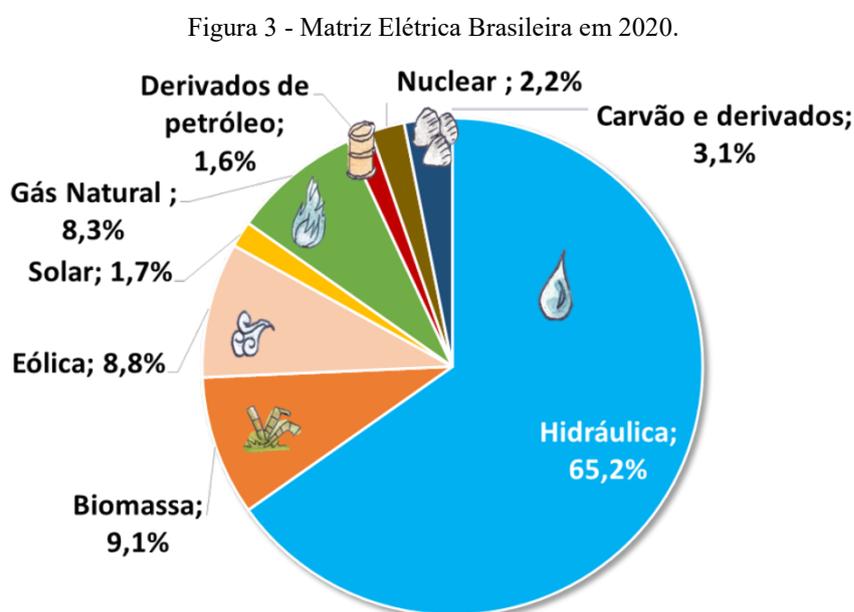
Fonte: IEA - International Energy Agency.⁸

Assim, em breve síntese, verifica-se que a matriz energética mundial nos últimos trinta anos não conseguiu escapar da dependência do carvão como sua principal fonte de geração de eletricidade através das termoeletricas enquanto que a energia hidrelétrica se manteve quase constante no seu percentual. A redução do percentual de uso de petróleo e energia nuclear veio com o aumento do percentual de uso do gás natural e fontes renováveis como a energia eólica e solar.

⁸ IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Data and statistics.** Disponível em: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-browser?country=WORLD&fuel=Electricity%20and%20heat&indicator=ElecGenByFuel> Acesso em: 04 mar. 2022.

2.1.2 Matriz elétrica brasileira

A matriz elétrica brasileira difere significativamente da matriz elétrica mundial, conforme se observa na Figura 3, e tem como sua principal fonte de energia elétrica, com quase dois terços do total, a geração hidrelétrica, com 65,2% em meados de 2020. Em segundo lugar, vem a geração de energia por biomassa com 9,1%, seguida pela energia eólica com 8,8% em terceiro lugar, pelo gás natural com 8,3% em quarto lugar, pelo carvão com 3,1% em quinto lugar, pela energia nuclear com 2,2% em sexto lugar, pela energia solar com 1,7% em sétimo lugar e com o petróleo e derivados com 1,6% em oitavo lugar.



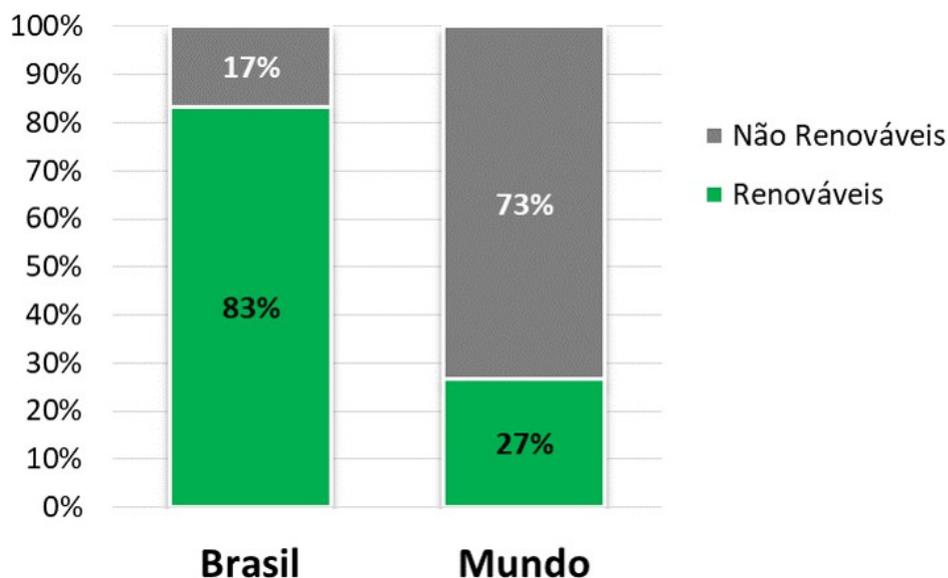
Fonte: EPE.⁹

A matriz elétrica brasileira utiliza aproximadamente 17% em fontes não renováveis de energia elétrica, sendo assim muito diferente da matriz elétrica mundial, que utiliza aproximadamente 83% de fontes não renováveis. Essa situação, além dos benefícios ambientais, traz maior segurança no abastecimento de energia elétrica, por reduzir a dependência de insumos para a geração de energia elétrica e consequentemente a eventual dependência de extração ou importação desses insumos.

⁹ EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Matriz Energética e Elétrica**. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica> Acesso em: 17 fev. 2022.

Esses projetos de geração de energia elétrica utilizando fontes renováveis, apesar do elevado investimento em infraestrutura, acabam conseguindo reduzir os custos de produção de energia, por não depender de insumos como carvão ou gás natural, que totalizam juntos 60,3% da matriz elétrica mundial, e no Brasil representam apenas 11,4% da matriz elétrica.

Figura 4 - Matriz Elétrica Brasileira e a Mundial em 2020.

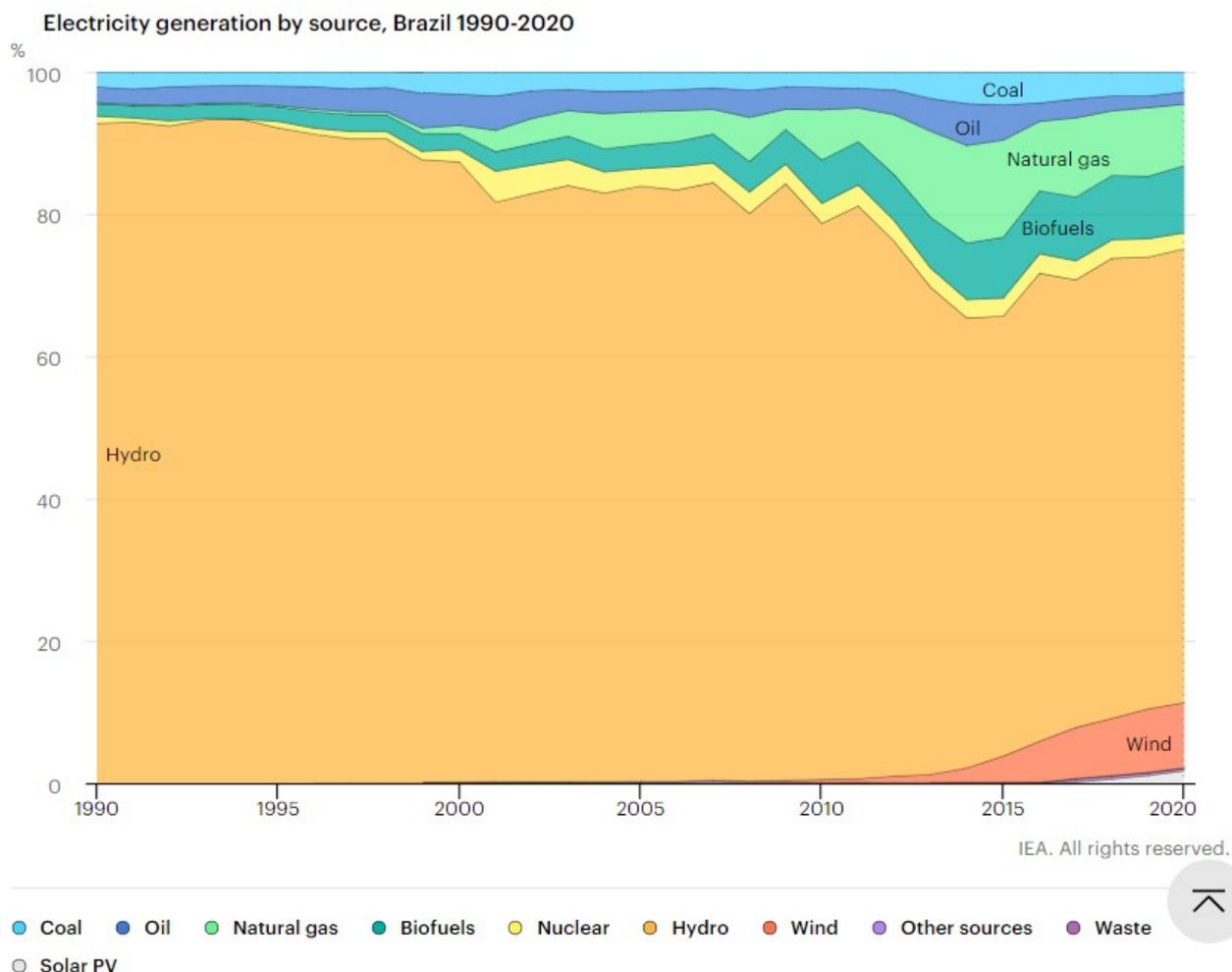


Fonte: EPE.¹⁰

As fontes renováveis, por outro lado, têm maior dependência dos fatores climáticos, tal como os ventos na energia eólica e a insolação na geração solar fotovoltaica, mas no caso brasileiro, a maior dependência são as chuvas para a manutenção do nível dos reservatórios das usinas hidrelétricas, em razão da extrema relevância que elas possuem na matriz elétrica brasileira.

¹⁰ EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Matriz Energética e Elétrica**. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica> Acesso em: 17 fev. 2022.

Figura 5 - Geração de energia elétrica no Brasil por fonte.



Fonte: IEA - International Energy Agency.¹¹

A dinâmica da matriz elétrica brasileira nos últimos trinta anos (Figura 5) mostra que a geração hidrelétrica já correspondeu a mais de noventa por cento da matriz elétrica brasileira em 1990, e veio reduzindo seu percentual na medida em que outras fontes de geração de eletricidade ganharam relevância, onde se destacam o aumento do uso do gás natural, da biomassa ou biocombustíveis e da geração eólica. A energia nuclear, o petróleo e o carvão mantiveram relativa constância em seus percentuais na matriz elétrica brasileira. A energia solar fotovoltaica vem aumentando rapidamente seu percentual nos últimos anos, e tem grande potencial pelas características geográficas favoráveis do território brasileiro.

¹¹ IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Data and statistics.** Disponível em: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-browser?country=WORLD&fuel=Electricity%20and%20heat&indicator=ElecGenByFuel> Acesso em: 04 mar. 2022.

2.1.3 Energia hidráulica ou hidrelétrica

No Brasil, conforme estudo da Aneel, 67% da energia gerada no país em 2021 e 62,48% da potência instalada vêm de usinas hidrelétricas, distribuídas em 739 centrais geradoras hidrelétricas, 425 pequenas centrais hidrelétricas e 219 usinas hidrelétricas, que são responsáveis por 109,3 gigawatts (GW) de capacidade instalada em operação. Ressalta-se ainda que três das usinas no país estão entre as dez maiores do planeta – Itaipu Binacional (14.000 MW, divididos entre Brasil e Paraguai), Belo Monte (11.233 MW) e Tucuruí (8.370 MW). Em 2020, a energia gerada no Brasil a partir de fonte hidráulica foi de 415.483 gigawatts-hora (GWh).¹²

A energia hidrelétrica tem sido a fonte principal de geração na matriz elétrica brasileira por várias décadas, tanto pela sua competitividade econômica quanto pela abundância deste recurso energético no Brasil, em função da extensa superfície territorial do país, com muitos planaltos e rios caudalosos. Conforme estudo da EPE, “o potencial hidrelétrico brasileiro é estimado em 172 GW, dos quais mais de 60% já foram aproveitados. Aproximadamente 70% do potencial ainda não aproveitado está localizado nas bacias hidrográficas Amazônica e Tocantins – Araguaia”.¹³

O estudo realizado pela EPE explica que as usinas hidrelétricas são recursos flexíveis, viabilizando a promoção de diversos serviços ancilares, tal como o controle automático de geração, controle de tensão e de frequência. Esclarece ainda que muitas hidrelétricas possuem reservatórios de acumulação, as quais “permitem regularizar as vazões afluentes aos rios, transferindo água de períodos úmidos para secos e, em alguns casos, de anos úmidos para anos secos”. Do mesmo modo, acrescenta o estudo, “seus reservatórios podem promover diversos usos da água, tais como: controle de cheias, irrigação, processamento industrial, suprimento de água para consumo humano, recreação e serviços de navegação”.¹⁴ Contudo, a capacidade de regularização dos reservatórios vem diminuindo gradualmente, devido ao aumento do consumo e às dificuldades para se construir novas usinas hidrelétricas e reservatórios de grande porte.

¹² ANEEL. AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **No Dia Mundial da Água, Aneel publica infográfico sobre hidrelétricas no Brasil**. Disponível em: <https://bit.ly/3rzpl7y> Acesso em: 17 jan. 2022.

¹³ EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Expansão da Geração** – Fontes Hidrelétricas. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/areas-de-atuacao/energia-eletrica/expansao-da-geracao/fontes> Acesso em: 04 mar. 2022.

¹⁴ EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Expansão da Geração** – Fontes Hidrelétricas. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/areas-de-atuacao/energia-eletrica/expansao-da-geracao/fontes> Acesso em: 04 mar. 2022.

Nesse contexto, as Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCHs) surgiram como forma de também aproveitar os abundantes recursos hídricos brasileiros para gerar energia, mas têm um impacto ambiental bastante reduzido em comparação com as grandes hidrelétricas convencionais. Essas usinas possuem capacidade instalada entre 5 MW a 30 MW e área de reservatório de até 13 quilômetros quadrados e são importantes para o futuro do setor elétrico, pautado pela ampliação do mercado livre.¹⁵

Além das PCHs, ainda existe a classificação denominada CGHs, que são as Centrais Geradoras Hidrelétricas, que também são geradoras de energia hidrelétrica. A diferença é que as CGHs são ainda menores, tanto em tamanho quanto em potência. Pela classificação Aneel, elas podem ter o potencial de gerar de 0 até 5 MW de energia. Segundo relatório da Associação Brasileira de PCHs e CGHs, em 2021 o Brasil contava com 732 unidades de CGHs em operação instaladas em todo seu território, contabilizando 808.665,67 KW (ou 808,66 MW) de potência instalada.¹⁶

Segundo Neves, em meados de 2021 as PCHs e CGHs, representavam 4% da matriz elétrica brasileira, totalizando 6.287 MW de potência instalada, “sendo 1.288 usinas em operação, concentradas principalmente no Sul, no Sudeste e no Centro-Oeste do Brasil, sendo o Mato Grosso o campeão em capacidade instalada, com 1.118 MW. E em construção, são mais 1.650 MW de pequenas centrais hidrelétricas no país”.¹⁷

Neves estima que até 2030, “a capacidade instalada de PCHs no Brasil deve aumentar para 8.900 MW, de acordo com o Plano Decenal de Expansão da Energia 2030 (PDE 2030), da Empresa de Pesquisa Energética (EPE). Essa capacidade adicional pode ser contratada tanto em leilões quanto no mercado livre e pode vir de novos projetos ou ampliações e modernizações de usinas já existentes”.¹⁸

¹⁵ ANEEL. AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução Normativa n. 875, de 10 de março de 2020**. Disponível em: <https://bit.ly/3Oq32Lr> Acesso em: 05 mar. 2022.

Art. 5º Os aproveitamentos hidrelétricos com as seguintes características serão enquadrados como Pequena Central Hidrelétrica (PCH): I - potência instalada superior a 5.000 kW e igual ou inferior a 30.000 kW; e II - área de reservatório de até 13 km² (treze quilômetros quadrados), excluindo a calha do leito regular do rio. § 1º A restrição de que trata o inciso II não se aplica aos aproveitamentos hidrelétricos cujo reservatório seja de regularização, no mínimo, semanal ou cujo dimensionamento, comprovadamente, tenha sido baseado em outros objetivos que não o de geração de energia elétrica; § 2º A regularização, de que trata o § 1º, será aferida por meio do volume útil e da vazão máxima turbinada.

¹⁶ ABRAPCH – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PCHS E CGHS. **O que são PCH's e CGH's**. Disponível em: <https://abrapch.org.br/o-setor/o-que-sao-pchs-e-cghs/> Acesso em: 05 mar. 2022.

¹⁷ NEVES, Livia. **Pequenas Centrais Hidrelétricas: qual o papel no futuro do setor elétrico?** Disponível em: <https://www.way2.com.br/blog/pequenas-centrais-hidreletricas/> Acesso em: 05 mar. 2022.

¹⁸ NEVES, Livia. **Pequenas Centrais Hidrelétricas: qual o papel no futuro do setor elétrico?** Disponível em: <https://www.way2.com.br/blog/pequenas-centrais-hidreletricas/> Acesso em: 05 mar. 2022.

No aspecto ambiental, Neves explica que por suas características renováveis, as PCHs e CGHs estão aptas a emitir e comercializar certificados de energia renovável (IRECs), que são emitidos no Brasil pelo Instituto Totum e que “esse certificado faz parte de um sistema global de rastreamento de atributos ambientais de energia, o *International REC Standard* (I-REC), os consumidores de eletricidade podem comprovar a rastreabilidade da energia renovável e reduzir a sua pegada de carbono”.¹⁹ Os certificados atendem necessidades de setores da economia que buscam compensar as emissões de carbono associadas às suas operações.

Outra forma de armazenamento e geração de energia elétrica, valendo-se de fonte hidráulica, são as Usinas Hidrelétricas Reversíveis (UHR), que em um contexto de transição energética e crescente participação das fontes renováveis de geração variável e intermitente, têm ganhado importância como forma de equilibrar a geração e o consumo, com benefícios reconhecidos relacionados à qualidade e confiabilidade dos sistemas elétricos, e também por ser considerada uma tecnologia de armazenamento madura, econômica e eficiente para o uso em escala sistêmica.²⁰

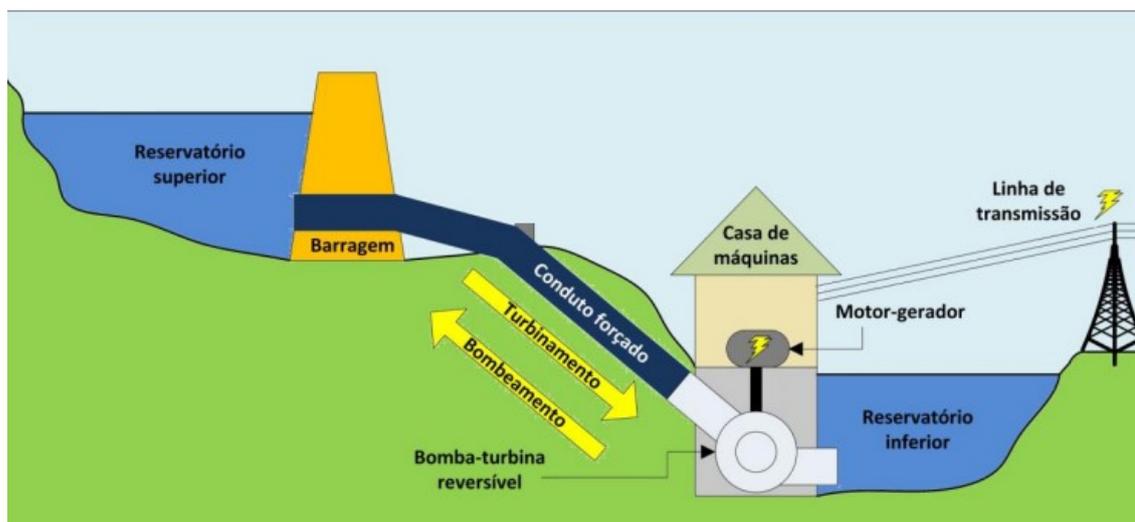
As UHRs são aquelas que possuem um mecanismo de bombeamento de água de um reservatório inferior para um superior. Elas também se baseiam no armazenamento de energia gravitacional da água através de uma diferença de elevação, “a diferença é que possuem um sistema de acumulação em um nível inferior que pode ser mecanicamente bombeado para nível superior, através de um conduto por uma bomba-turbina reversível utilizando energia extra de outra fonte geradora”.²¹

¹⁹ NEVES, Livia. **Pequenas Centrais Hidrelétricas**: qual o papel no futuro do setor elétrico? Disponível em: <https://www.way2.com.br/blog/pequenas-centrais-hidreletricas/> Acesso em: 05 mar. 2022.

²⁰ EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Usinas Hidrelétricas Reversíveis (UHR)**: Desafios para inserção em mercados de energia elétrica. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-561/EPE-DEE-NT-013_2021-r0.pdf Acesso em: 05 mar. 2022. p. 1.

²¹ CBIE – CENTRO BRASILEIRO DE INFRA ESTRUTURA. **O que são hidroelétricas reversíveis?** Disponível em: <https://cbie.com.br/artigos/o-que-sao-hidroeletricas-reversiveis/> Acesso em: 05 mar. 2022.

Figura 6 - Ilustração de uma Usina Hidrelétrica Reversível (UHR).



Fonte: CBIE.²²

Contudo, o estudo da EPE mostra que internacionalmente, “as condições regulatórias e os modelos de negócios criados com a reestruturação dos mercados de energia elétrica, em geral, ainda não foram suficientes para promover o investimento pelo capital privado em novas UHR”, mas que mais de 95% das UHR existentes no mundo foram comissionadas em estruturas monopolistas de mercado, com a recuperação do capital garantida pelo modelo de remuneração.²³

No estudo realizado pela EPE, verificou-se que:

No Brasil, a grande participação das usinas hidrelétricas na matriz elétrica permitiu postergar o uso de tecnologias de armazenamento como as Usinas Hidrelétricas Reversíveis (UHR) e o endereçamento das questões regulatórias e de desenho de mercado associadas. No entanto, com a redução de implantação de novos projetos hidrelétricos, sobretudo com capacidade de regularização, e com o crescimento da inserção de fontes renováveis não despacháveis e de geração variável no SIN, as UHR podem se tornar uma alternativa atrativa para suprir as crescentes necessidades do sistema interligado relacionadas à capacidade e à flexibilidade, em diferentes escalas temporais, e com possíveis vantagens relacionadas à localização e aos impactos socioambientais. Além disso, a implantação das UHR no país pode ser facilitada pela larga experiência local com o desenvolvimento de projetos hidrelétricos, inclusive com cadeia de suprimentos já estabelecida.²⁴

²² CBIE – CENTRO BRASILEIRO DE INFRA ESTRUTURA. **O que são hidroelétricas reversíveis?** Disponível em: <https://cbie.com.br/artigos/o-que-sao-hidroeletricas-reversiveis/> Acesso em: 05 mar. 2022.

²³ EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Usinas Hidrelétricas Reversíveis (UHR):** Desafios para inserção em mercados de energia elétrica. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-561/EPE-DEE-NT-013_2021-r0.pdf Acesso em: 05 mar. 2022. p. 4.

²⁴ EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Usinas Hidrelétricas Reversíveis (UHR):** Desafios para inserção em mercados de energia elétrica. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-561/EPE-DEE-NT-013_2021-r0.pdf Acesso em: 05 mar. 2022. p. 4-5.

O uso das UHRs pode ganhar importância na transição do sistema unidirecional de geração de energia, para um ambiente bidirecional, na medida em que os excedentes da geração intermitente poderiam ser armazenados na forma de energia potencial hidráulica. Isso acaba introduzindo estabilidade ao sistema ao aumentar a capacidade de geração e a consequente disponibilidade para responder a picos de consumo em momentos de queda na geração das fontes renováveis solar e eólica em especial, devido à intermitência inerente.

2.1.4 Biomassa

A geração elétrica a partir da biomassa é a segunda principal fonte de energia da matriz elétrica brasileira, totalizando 9,1% em meados de 2020. Ela se dá principalmente por meio da termelétricidade, ou seja, oriunda da combustão da biomassa, que é convertida em energia mecânica e, em última instância, em energia elétrica.

Estudo realizado pela EPE traz que o Brasil é reconhecidamente beneficiado pelas suas características de solo e clima, viabilizando que diversas fontes de biomassa prosperem de forma abrangente e competitiva. Assim, a geração de energia elétrica por biomassa é vista de forma muito promissora para o futuro energético sustentável.²⁵

O relatório da EPE explica que a biomassa é um recurso energético primário, e sua utilização se dá por tecnologias diversas, nas quais o estado físico dos insumos utilizados é de suma importância. Assim, as diversas formas de biomassas foram agrupadas de maneira em que a tecnologia utilizada fosse a que oferecesse uso mais eficiente, obtendo como produto final a energia ou o recurso energético secundário a ser direcionado para as soluções de geração termelétrica. Portanto, classificam-se como biomassa: 1) Resíduos da cana-de-açúcar (bagaço, palhas e pontas, vinhaça e torta de filtro); 2) Resíduos da indústria madeireira (cavaco); 3) Palhas das culturas de soja e milho; 4) Cascas de arroz e café; 5) Resíduos de coco, feijão, amendoim, mandioca e cacau; 6) Resíduos agroindustriais e pecuária de confinamento; 7) Lodo de estação de tratamento de esgoto; 8) Resíduos sólidos urbanos (RSU); e 9) Resíduos das vinícolas.²⁶

²⁵ EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Papel da biomassa na expansão da geração de energia elétrica.** Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-227/topico-457/Biomassa%20e%20Expans%C3%A3o%20de%20Energia.pdf> Acesso em: 05 mar. 2022. p. 6.

²⁶ EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Papel da biomassa na expansão da geração de energia elétrica.** Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-227/topico-457/Biomassa%20e%20Expans%C3%A3o%20de%20Energia.pdf> Acesso em: 05 mar. 2022. p. 6.

Além da obtenção de energia armazenada na biomassa através dos termogeradores ou termoelétricas, onde ocorre a queima da biomassa para gerar aquecimento de água ou outro fluido que acabará ao final gerando um movimento mecânico num gerador elétrico, produzindo eletricidade, também há formas de transformar a energia de alguns tipos de biomassa, diretamente em energia elétrica através de processos eletroquímicos, tal como as células de combustível.

A célula de combustível funciona de forma semelhante a uma bateria convencional. Nesta a energia elétrica precisa ser injetada e fica armazenada quimicamente em seu interior, e pode ser extraída posteriormente diretamente na forma de eletricidade. Na célula de combustível, o insumo obtido pela biomassa necessita ser suprido constantemente em um dos eletrodos, que reage eletroquimicamente com um oxidante (oxigênio, por exemplo) suprido no outro eletrodo. Entre os eletrodos existe um eletrólito composto por um material que permite o fluxo de íons, induzindo assim uma corrente elétrica através do circuito externo. Assim, o combustível fornecido pela biomassa é transformado diretamente em eletricidade por processos eletroquímicos, sem necessitar de equipamentos mecânicos para isso, com os consequentes ganhos ambientais e em eficiência energética.

2.1.5 Eólica

A geração eólica de eletricidade é a terceira principal fonte de energia da matriz elétrica brasileira, totalizando 8,8% em meados de 2020. Ela se dá utilizando geradores elétricos acoplados a turbinas eólicas, instalados em regiões com histórico de ventos favoráveis de forma a alcançar boa eficiência nesse tipo de geração de eletricidade.

Estudo da EPE de junho de 2020 traz que “a região Nordeste concentra quase 90% da capacidade eólica instalada no país e possui diferentes perfis de vento dependendo do local”. Na EPE, estes perfis são analisados em escalas anuais, mensais e horárias, buscando avaliar a contribuição da fonte eólica, sobretudo em momentos de menor geração, como foi o caso do 1º trimestre de 2020. Esse conhecimento sobre o comportamento do vento, ao efeito portfólio, com critérios de planejamento robustos e à diversificação da matriz, minimiza o impacto de períodos de menor geração eólica.²⁷

²⁷ EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Energia eólica no Nordeste**. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/imprensa/noticias/epe-publica-fact-sheet-energia-eolica-no-nordeste-e-o-boletim-trimestral-de-energia-eolica-junho-2020-> Acesso em: 05 mar. 2022.

MacDonald-Murray explica que na última década, a produção de energia eólica do Brasil cresceu 20 vezes e agora atinge aproximadamente 20 GW de capacidade instalada, e que durante 2020, o fator de capacidade eólica foi superior a 40%, em comparação com a média global de 35%, o que demonstra a eficiência da geração eólica no território nacional. Lembra ainda que com 7.400 km de costa atlântica, há uma oportunidade significativa para o setor eólico *offshore* no Brasil, através da instalação de geradores eólicos flutuantes no oceano.²⁸

2.1.6 Gás natural

A utilização do gás natural para a geração de energia elétrica é a quarta principal fonte de energia da matriz elétrica brasileira, totalizando 8,3% em meados de 2020, valendo-se principalmente de usinas termelétricas. A demanda de gás natural para a geração de eletricidade depende da frequência de acionamento das usinas térmicas a gás, que por sua vez, depende da política de operação do sistema elétrico, que é função de uma série de outros fatores como a situação hidrológica e o balanço oferta-demanda do sistema elétrico. “Assim, sua projeção é obtida com base nas simulações do despacho hidrotérmico para atendimento à carga de energia elétrica, utilizando os modelos de despacho hidrotérmico para a operação do sistema”.²⁹

O gás natural é um combustível fóssil com origem na decomposição de matéria orgânica ao longo de milhares de anos, submetida a condições ideais de pressão e temperatura. Ele é composto por “hidrocarbonetos leves, como metano, etano, propano e butano, ele pode ser originalmente encontrado em acumulações de rochas porosas no subsolo terrestre ou marinho em seu estado gasoso. Apesar de ser considerado um recurso não renovável, o gás natural é mais limpo e eficiente do que as fontes de energia dessa mesma classe, como o petróleo”.³⁰

Em estudo realizado pela EPE referente aos gasodutos de transporte internacional para a importação de gás natural pelo Brasil dos países vizinhos, como a Bolívia, analisaram-se as

²⁸ MACDONALD-MURRAY, Jamie. **Forte crescimento previsto para a energia renovável do Brasil em 2022**. Disponível em: <https://canalsolar.com.br/forte-crescimento-previsto-para-a-energia-renovavel-do-brasil-em-2022/> Acesso em: 05 mar. 2022.

²⁹ EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Consumo de Gás Natural**. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/areas-de-atuacao/petroleo-gas-e-biocombustiveis/consumo-de-g%C3%AAs-natural> Acesso em: 05 mar. 2022.

³⁰ E-CYCLE. **O que é gás natural, seus usos e riscos?** Disponível em: <https://www.ecycle.com.br/gas-natural/> Acesso em: 06 mar. 2022.

perspectivas de importação de gás natural a partir destes países no horizonte de planejamento, bem como os preços de importação. Nesses estudos a EPE publicou pesquisas relacionadas à Expansão da Malha de Transporte Dutoviário do País, contendo análises técnicas, econômicas e socioambientais acerca da infraestrutura de gasodutos de transporte existente e alternativas de expansão desta malha.³¹

Apesar de na matriz elétrica brasileira o gás natural representar quase um terço do que representa na matriz elétrica mundial, ele tem grande importância para manter os níveis dos reservatórios das hidrelétricas e por ser uma fonte despachável, que traz estabilidade ao sistema elétrico. Em função do aumento de geração de energia elétrica por fontes renováveis, com sua inevitável intermitência e imprevisibilidade, haverá a necessidade de fontes despacháveis para trazer segurança e estabilidade ao sistema elétrico, especialmente nos picos de consumo.

2.1.7 Carvão e derivados

A utilização do carvão e seus derivados para a geração de energia elétrica é a quinta principal fonte de energia da matriz elétrica brasileira, com um total de 3,1% em meados de 2020, oriunda principalmente de usinas termelétricas. A tecnologia termelétrica para a transformação da energia acumulada no carvão mineral para energia elétrica está bem desenvolvida e é economicamente competitiva.

O carvão mineral é um combustível fóssil extraído da terra por meio da mineração. Origina-se pela “decomposição da matéria orgânica (restos de árvores e plantas) que se acumulou sob uma lâmina de água há milhões de anos. O soterramento dessa matéria orgânica por depósitos de argila e areia provoca o aumento na pressão e na temperatura, o que contribui para a concentração dos átomos de carbono e expulsão dos átomos de oxigênio e hidrogênio (carbonificação)”.³²

Segundo dados da Aneel, o carvão mineral é o combustível fóssil com a maior disponibilidade do mundo, e as reservas mundiais totalizam 847,5 bilhões de toneladas e são encontradas em quantidades expressivas em 75 países. Contudo, aproximadamente 60% do total estão concentrados nos Estados Unidos (28,6%), Rússia (18,5%) e China (13,5%), onde

³¹ EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Oferta e Infraestrutura de Gás Natural**. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/areas-de-atuacao/petroleo-gas-e-biocombustiveis/oferta-e-infraestrutura-de-g%C3%A1s-natural> Acesso em: 06 mar. 2022.

³² E-CYCLE. **Carvão mineral: o que é e impactos**. Disponível em: <https://www.ecycle.com.br/carvao-mineral/> Acesso em: 06 mar. 2022.

o Brasil aparece na 10ª posição. Estima-se que essa quantidade seria suficiente para atender a produção atual de carvão por um período aproximado de 130 anos.³³

O estudo sobre o carvão mineral realizado pela Aneel explica que ele é uma das formas de produção de energia mais agressivas ao meio ambiente. Ainda que sua utilização gere benefícios econômicos como empregos, aumento da demanda por bens e serviços na região e aumento da arrecadação tributária, é sabido que o processo de produção, da extração até a combustão, provoca significativos impactos socioambientais.³⁴

No Brasil, como se verificou, a utilização do carvão mineral para geração de energia elétrica é bem restrita, divergindo expressivamente da média mundial, e isso é resultante de fatores como a vocação brasileira para utilização de fontes hídricas na produção de energia elétrica e a baixa qualidade da maior parte do carvão nacional, impedindo seu transporte por grandes distâncias e afetando o grau de rendimento da usina termelétrica quando comparado com carvões de alto poder calorífico.³⁵

Conforme informação divulgada no G1, o sistema elétrico brasileiro foi planejado para assegurar a geração de energia nos momentos de clima desfavorável, o que deu origem a várias usinas termelétricas a carvão mineral, como o Complexo Termelétrico Jorge Lacerda, com 857 megawatts de capacidade ao final de 2021, no sul catarinense. Segundo um relatório do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), a operação de Jorge Lacerda durante um ano contribuiu para preservar em até 5,1% os níveis dos reservatórios das hidroelétricas no Sudeste e no Centro-Oeste do Brasil.³⁶

Na avaliação da Aneel, considerando-se a “atual pressão existente no mundo pela preservação ambiental – principalmente com relação ao efeito estufa e às mudanças climáticas – é possível dizer, portanto, que o futuro da utilização do carvão está diretamente atrelado a investimentos em obras de mitigação e em desenvolvimento de tecnologias limpas (*clean coal technologies*, ou CCT)”.³⁷

³³ ANEEL. **Carvão Mineral**. Disponível em: http://www2.Aneel.gov.br/arquivos/PDF/atlas_par3_cap9.pdf. Acesso em: 06 mar. 2022. p. 134.

³⁴ ANEEL. **Carvão Mineral**. Disponível em: http://www2.Aneel.gov.br/arquivos/PDF/atlas_par3_cap9.pdf. Acesso em: 06 mar. 2022. p. 140.

³⁵ ANEEL. **Carvão Mineral**. Disponível em: http://www2.Aneel.gov.br/arquivos/PDF/atlas_par3_cap9.pdf. Acesso em: 06 mar. 2022. p. 138.

³⁶ G1. **Usinas termelétricas a carvão auxiliam no combate à crise hídrica no Brasil**. Disponível em: <https://g1.globo.com/sc/santa-catarina/especial-publicitario/siecesc/carvao-mineral-futuro-sustentavel/noticia/2021/10/20/usinas-termelétricas-a-carvao-auxiliam-no-combate-a-crise-hídrica-no-brasil.ghtml>. Acesso em: 06 mar. 2022.

³⁷ ANEEL. **Carvão Mineral**. Disponível em: http://www2.Aneel.gov.br/arquivos/PDF/atlas_par3_cap9.pdf. Acesso em: 06 mar. 2022. p. 140.

Assim, apesar do carvão mineral não ser energia renovável, e ainda emitir carbono na atmosfera, possui importância estratégica na matriz elétrica brasileira como fonte energética previsível, trazendo estabilidade ao sistema e constituindo uma retaguarda de forma a evitar que crises hídricas se transformem em crises energéticas e seus consequentes problemas sociais, bem como complementando a intermitência da geração elétrica das energias renováveis como a solar e eólica.

2.1.8 Energia nuclear

A energia nuclear para a geração de energia elétrica é a sexta principal fonte de energia da matriz elétrica brasileira, com um total 2,2% em meados de 2020, valendo-se das usinas nucleares de Angra 1 e Angra 2.

O Programa Nuclear Brasileiro teve origem em 1975, com a assinatura de um acordo com a Alemanha, objetivando a construção de oito reatores nucleares para geração de eletricidade. Contudo, posteriormente esses planos foram reduzidos para a realização de apenas três projetos, todos localizados em Angra dos Reis (RJ). A usina nuclear de Angra 1 foi a primeira a entrar em operação em 1985, e Angra 2 foi ativada apenas em 2001. Essas duas usinas nucleares são gerenciadas pela Eletrobrás e geram 2 gigawatts (GW) de potência, o equivalente a 2,2% da capacidade de geração nacional de eletricidade.³⁸

A terceira usina prevista no acordo com a Alemanha, Angra 3, começou a ser construída em 1984 e sua obra foi paralisada várias vezes por denúncias de corrupção e superfaturamento. O término de sua construção e início das operações estão previstos para 2026, adicionando 1,4 GW ao sistema elétrico brasileiro.³⁹ De acordo com o Plano Nacional de Energia 2050, publicado pela EPE, o Brasil pretende ter uma capacidade instalada de energia nuclear entre 8 GW e 10 GW nas próximas três décadas, aí já incluído a energia a ser gerada por Angra 3 e pela nova usina anunciada recentemente.⁴⁰

³⁸ TECMUNDO. **Governo planeja construir nova usina nuclear no Brasil até 2031**. Disponível em: <https://www.tecmundo.com.br/ciencia/228365-governo-planeja-construir-nova-usina-nuclear-brasil-2031.htm> Acesso em: 06 mar. 2022.

³⁹ TECMUNDO. **Governo planeja construir nova usina nuclear no Brasil até 2031**. Disponível em: <https://www.tecmundo.com.br/ciencia/228365-governo-planeja-construir-nova-usina-nuclear-brasil-2031.htm> Acesso em: 06 mar. 2022.

⁴⁰ EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Plano Nacional de Energia 2050**. Disponível em: <https://bit.ly/3v4wWgB> Acesso em: 06 mar. 2022.

A energia nuclear teve forte crescimento mundial a partir dos anos 1950 até alcançar o patamar de aproximadamente 400 reatores em operação no final dos anos 1990, totalizando mais de 300 GW de potência. Nos anos 1990 a 2000 verificou-se certa estagnação, com uma pequena ampliação de potência instalada para 370 GW. Essa estagnação teve influência dos acidentes de Three Mile Island (EUA, 1979) e Chernobyl (hoje Ucrânia, 1986), bem como do contrachoque do petróleo (1986) e da maior competitividade do gás natural vista durante os anos 1990. Já nos anos 2010, o acidente de Fukushima (Japão, 2011) que levou ao desligamento temporário de todas as usinas nucleares japonesas, trouxe incerteza para os novos projetos de investimento em energia nuclear. Em março de 2020, havia mundialmente 443 reatores nucleares em operação com uma capacidade operacional de 391 GW, distribuídos em 31 países.⁴¹

O Brasil possui consideráveis recursos naturais em urânio, mas apesar da probabilidade de existir novas reservas e autonomia na extração de combustível nuclear, fator favorável para o uso desse tipo de energia, grande parte do território nacional ainda não foi prospectado. O país domina toda a tecnologia do ciclo do combustível nuclear, desde a mineração até a montagem do elemento combustível, sendo que a única etapa do processo realizada no exterior é a conversão e enriquecimento, em função da escala, que só com as usinas de Angra 1 e 2 é insuficiente para a viabilidade econômica.⁴²

Por não utilizar combustíveis fósseis, a geração de eletricidade através de energia nuclear contribuiu para a redução da emissão de gases de efeito estufa, bem como adicionou resiliência e robustez ao sistema elétrico na transição energética, considerando as perspectivas da participação cada vez maior das fontes renováveis não despacháveis ou com intermitência no seu fornecimento, sendo responsável em meados de 2020 por 10,2% da matriz elétrica mundial.⁴³

⁴¹ EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Plano Nacional de Energia 2050**. Disponível em: <https://bit.ly/3v4wWgB> Acesso em: 06 mar. 2022 [p. 126].

⁴² EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Plano Nacional de Energia 2050**. Disponível em: <https://bit.ly/3v4wWgB> Acesso em: 06 mar. 2022 [p. 127].

⁴³ EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Plano Nacional de Energia 2050**. Disponível em: <https://bit.ly/3v4wWgB> Acesso em: 06 mar. 2022 [p. 126].

2.1.9 Energia solar

O uso de energia solar para a geração de energia elétrica é a sétima principal fonte de energia da matriz elétrica brasileira, com um total de 1,7% em meados de 2020, sendo que foi a que apresentou maior crescimento percentual recente, trazendo grandes perspectivas para essa modalidade de energia renovável.

O Plano Nacional de Energia 2050 explica que a energia solar vem sendo a fonte que apresenta o maior incremento de capacidade instalada atualmente no mundo, em função dos preços decrescentes verificados nos últimos anos e da robustez dos projetos, alguns há mais de 30 anos em funcionamento. Nesse sentido, por sua localização geográfica, o Brasil recebe elevados índices de radiação solar, com boa distribuição por todo o território nacional, viabilizando projetos de geração solar nas diferentes regiões do país. A redução dos custos de infraestrutura em função dos ganhos na escala de produção já tornou a energia solar fotovoltaica competitiva no fornecimento de energia elétrica, contribuindo com o aumento da matriz elétrica brasileira e com a redução da emissão de carbono na atmosfera, que leva ao efeito estufa. A modularidade da tecnologia de geração fotovoltaica viabiliza projetos de diferentes escalas, desde pequenos projetos residenciais de geração distribuída, até grandes usinas solares centralizadas.⁴⁴

A geração solar fotovoltaica se dá pela conversão direta da energia contida na luz solar em energia elétrica, utilizando painéis solares feitos de material semicondutor, que ao receber a incidência dos fótons de luz solar cria uma corrente elétrica entre seus polos, pelo efeito fotovoltaico.⁴⁵

Além da geração fotovoltaica, a energia solar também pode ser obtida pela tecnologia heliotérmica, que utiliza espelhos ou outros dispositivos para concentrar a luz solar. Essa luz concentra-se de forma a aquecer um fluido que, por meio de trocadores de calor, irá produzir vapor de água para gerar movimento, acionando com esse movimento geradores elétricos para obter eletricidade. Nos últimos anos não houve grande evolução dessa tecnologia, que atualmente só tem viabilidade econômica para grandes usinas, e com a rápida evolução da

⁴⁴ EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Plano Nacional de Energia 2050**. Disponível em: <https://bit.ly/3v4wWgB> Acesso em: 06 mar. 2022 [p. 108].

⁴⁵ PORTALSOLAR. **Como funciona o Pannel Solar Fotovoltaico (Placas Fotovoltaicas)**. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/como-funciona-o-pannel-solar-fotovoltaico.html> Acesso em: 06 mar. 2022.

geração por placas fotovoltaicas, a geração heliotérmica tem baixa expectativa de avanços no país no curto prazo.⁴⁶

Na geração solar fotovoltaica, há um fator de incerteza no planejamento de longo prazo devido a sua rápida evolução tecnológica. A indústria tem conseguido implementar rapidamente as novas soluções tecnológicas, tornando alguns projetos obsoletos em poucos anos. O estudo da EPE exemplifica essa situação com a migração dos projetos em estrutura fixa das placas fotovoltaicas, onde em 2014 totalizava 91%, para projetos de fixação com rastreamento em um eixo, com maior eficiência de geração, que em 2017 já totalizava 97% dos projetos.⁴⁷

As células fotovoltaicas também têm obtido grande avanço na sua tecnologia, com aumento da eficiência, redução de custos, aumento da durabilidade, entre outros avanços. Os módulos ou placas também têm aumentado seu tamanho padrão de 1,6 m² para 2,0 m² por unidade, e com incrementos na tecnologia, consegue-se cada vez mais energia por m², o que demanda menor área para a implantação de soluções de geração solar fotovoltaica. Assim, a rápida evolução da tecnologia da indústria de geração solar fotovoltaica, e sua capacidade de se reinventar e encontrar novas soluções, cria a expectativa que a trajetória de redução dos custos continue aumentando sua competitividade e potencial de inserção na matriz elétrica brasileira e mundial.⁴⁸

2.1.10 Petróleo e derivados

A utilização do petróleo e seus derivados para a geração de energia elétrica é a oitava principal fonte de energia da matriz elétrica brasileira, com um total de 1,6% em meados de 2020. Estudo realizado pelo Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia (IBICT), explica que o “petróleo é uma mistura de hidrocarbonetos (moléculas de carbono e hidrogênio) que tem origem na decomposição de matéria orgânica, principalmente o plâncton (plantas e animais microscópicos em suspensão nas águas), causada pela ação de bactérias em meios com baixo teor de oxigênio. Ao longo de milhões de anos, essa decomposição foi se

⁴⁶ EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Plano Nacional de Energia 2050**. Disponível em: <https://bit.ly/3v4wWgB> Acesso em: 06 mar. 2022 [p. 108].

⁴⁷ EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Plano Nacional de Energia 2050**. Disponível em: <https://bit.ly/3v4wWgB> Acesso em: 06 mar. 2022 [p. 110].

⁴⁸ EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Plano Nacional de Energia 2050**. Disponível em: <https://bit.ly/3v4wWgB> Acesso em: 06 mar. 2022 [p. 110].

acumulando no fundo dos oceanos, mares e lagos e, pressionada pelos movimentos da crosta terrestre, transformou-se na substância oleosa denominada petróleo”.⁴⁹

Embora o petróleo seja conhecido desde os primórdios da civilização humana, somente em meados do século XIX se iniciou sua exploração comercial, com grande expansão principalmente nos Estados Unidos e na Europa, e durante muitas décadas, o petróleo foi o grande propulsor da economia internacional, chegando a representar, no início dos anos 1970, quase 50% do consumo mundial de energia primária, e embora venha reduzindo sua participação, ela ainda representa 43%. A geração de energia elétrica utilizando a queima de combustíveis fósseis em termelétricas, enfrenta forte concorrência do carvão e do gás natural.⁵⁰

Como fonte de energia primária, o petróleo e seus derivados apresentam predominância no setor de transportes, mas também são responsáveis pela geração de energia elétrica em diversos países do mundo, inclusive no Brasil. “É possível gerar energia elétrica a partir da queima desses derivados em caldeiras, turbinas e motores de combustão interna. Os derivados de petróleo normalmente usados para essa finalidade são o óleo de combustível, o óleo ultraviscoso, o óleo diesel e o gás de refinaria”.⁵¹

No aspecto ambiental é onde se encontram os principais impactos negativos da geração de energia elétrica a partir do petróleo e derivados, devido à emissão de poluentes na atmosfera, principalmente os chamados gases de efeito estufa. Ainda há os riscos de acidentes ambientais, que ocorrem ocasionalmente no transporte marítimo do petróleo, que ao ser derramado gera inúmeros prejuízos aos ecossistemas, morte de peixes, corais e outros animais aquáticos.⁵²

No Brasil, o petróleo e seus derivados acabam sendo utilizados principalmente para atender as ocorrências de picos no sistema elétrico e para suprir a demanda de comunidades não atendidas pelo sistema interligado de energia elétrica.⁵³ Com o aumento das fontes renováveis e intermitentes, haverá a necessidade de fontes despacháveis para trazer

⁴⁹ IBICT – INSTITUTO BRASILEIRO DE INFORMAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA. **Petróleo**. Disponível em: <https://livroaberto.ibict.br/bitstream/1/582/8/07%20-%20Petr%C2%BEleo%282%29.pdf> Acesso em: 06 mar. 2022. p. 111.

⁵⁰ IBICT – INSTITUTO BRASILEIRO DE INFORMAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA. **Petróleo**. Disponível em: <https://livroaberto.ibict.br/bitstream/1/582/8/07%20-%20Petr%C2%BEleo%282%29.pdf> Acesso em: 06 mar. 2022. p. 111.

⁵¹ E-CYCLE. **Petróleo**: o que é e para que serve? Disponível em: <https://www.ecycle.com.br/petroleo/> Acesso em: 06 mar. 2022.

⁵² E-CYCLE. **Petróleo**: o que é e para que serve? Disponível em: <https://www.ecycle.com.br/petroleo/> Acesso em: 06 mar. 2022.

⁵³ E-CYCLE. **Petróleo**: o que é e para que serve? Disponível em: <https://www.ecycle.com.br/petroleo/> Acesso em: 06 mar. 2022.

estabilidade ao sistema, atuando nos momentos de pico e nos momentos de baixa geração de energia renovável. Nesses casos, o petróleo e seus derivados cabem bem nessa categoria enquanto não houver melhores opções.

2.2 SISTEMAS DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA

2.2.1 Configuração

Os sistemas de transmissão de energia elétrica objetivam transportar os grandes fluxos de energia elétrica gerados nas grandes usinas para os centros de distribuição e consumo. Normalmente utilizam linhas de transmissão de energia em alta voltagem em torres de altura elevada, para conseguir despachar grandes quantidades de energia no mínimo de tempo, ou seja, despachar a energia com máxima potência. A utilização de linhas de transmissão em alta voltagem permite trabalhar com corrente elétrica reduzida, de forma a ter economia na infraestrutura, já que nesse caso o dimensionamento permite utilizar fiação mais fina e leve. Ou seja, quanto maior a tensão (voltagem), menor a corrente elétrica necessária para se manter a mesma potência.

Conforme apresentado no plano decenal de expansão de energia da EPE, no Brasil a rede básica de transmissão do Sistema Interligado Nacional (SIN), que compreende as tensões de 230 kV a 750 kV, “tem como principais funções: (i) a transmissão da energia gerada pelas usinas para os grandes centros de carga; (ii) a integração entre os diversos elementos do sistema elétrico para garantir estabilidade e confiabilidade da rede; (iii) a interligação entre as bacias hidrográficas e regiões com características hidrológicas heterogêneas de modo a otimizar a geração hidrelétrica; e (iv) a integração energética com os países vizinhos”.⁵⁴

Nesse sentido, a expansão da Rede Básica de transmissão, deve ser pensada de forma a viabilizar que os agentes de mercado tenham livre acesso à rede, criando um ambiente favorável para a competição na geração e na comercialização de energia elétrica, já que operam no sistema interligado. Ao eliminar os gargalos regionais, este sistema possibilita que

⁵⁴ EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2026**. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-40/PDE2026.pdf> Acesso em: 07 mar. 2022. p. 111.

a interligação traga estabilidade ao sistema elétrico, permitindo ainda uma equalização dos preços da energia entre os submercados.⁵⁵

O estudo da EPE denominado Plano Decenal de Expansão de Energia 2026 explica que o papel da rede de transmissão é planejado de forma a proporcionar, além de “condições adequadas de confiabilidade da operação e do suprimento elétrico, também a flexibilidade de acomodar diferentes estratégias de implantação das fontes de geração a serem contratadas nos leilões de energia”.⁵⁶ Ademais, o crescente prazo de implantação das instalações de transmissão, por dificuldades diversas, exige que o planejamento antecipe a recomendação dos reforços estruturantes de transmissão no sistema interligado, sendo fundamental uma “harmonização entre os cronogramas de implantação das usinas e dos sistemas de transmissão a elas dedicados, possibilitando uma estratégia combinada de contratação de geração e transmissão, visando evitar os descompassos entre esses cronogramas”.⁵⁷

A Figura 7 ilustra, de forma esquemática, a configuração do Sistema Interligado Nacional (SIN) referente ao ano de 2015, indicando também algumas instalações a serem implantadas até 2024.⁵⁸

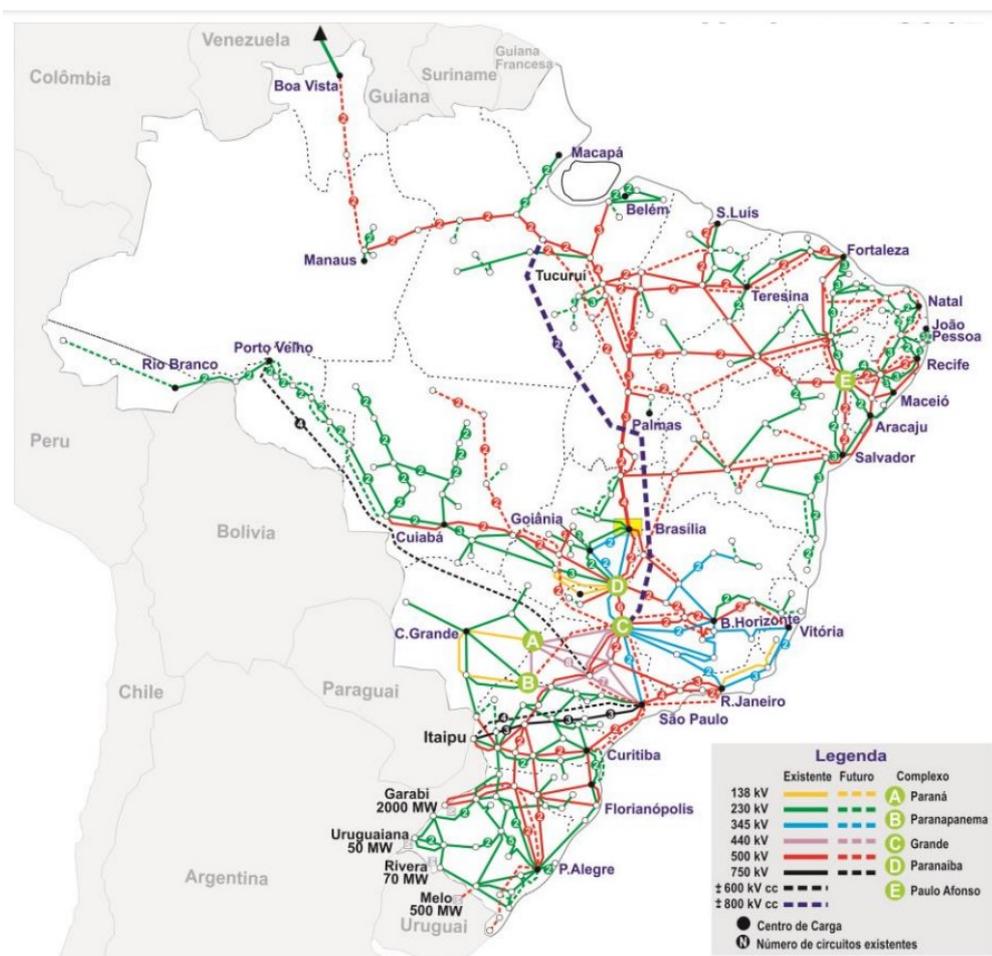
⁵⁵ EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2026**. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-40/PDE2026.pdf> Acesso em: 07 mar. 2022. p. 108.

⁵⁶ EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2026**. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-40/PDE2026.pdf> Acesso em: 07 mar. 2022. p. 108-109.

⁵⁷ EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2026**. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-40/PDE2026.pdf> Acesso em: 07 mar. 2022. p. 109.

⁵⁸ EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Transmissão de Energia Elétrica**. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-40/topico-70/Cap4_Texto.pdf Acesso em: 06 mar. 2022.

Figura 7 - Configuração do SIN referente ao ano de 2015.



Fonte: EPE (2015).

O planejamento da EPE indica que para avançar na metodologia será necessário um modelo computacional de apoio às atividades de planejamento que permita otimizar simultaneamente os investimentos e a operação do sistema elétrico nacional, “preferencialmente em base horária, com representação de incerteza na produção dos recursos não despacháveis, dos recursos hidroelétricos, de restrições de operação térmicas de curto prazo – como *unit commitment* – e de falha dos geradores”.⁵⁹ A representação das incertezas no crescimento da demanda também deve estar prevista nos estudos de planejamento, de forma a desenvolver ferramentas que possibilitem avaliar de forma mais adequada os

⁵⁹ EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2026**. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-40/PDE2026.pdf> Acesso em: 07 mar. 2022. p. 57.

impactos da inserção crescente destas novas tecnologias de geração renovável na matriz brasileira.⁶⁰

Nesse sentido, as regras de contratação devem se ajustar aos novos serviços necessários ao sistema elétrico. “Atualmente, o único serviço valorado nos leilões é a energia comercializada, cujo lastro é estabelecido pelas garantias físicas. Com essa modalidade de contratação, o sistema deve atender não só a carga de energia, obtida pelo montante acumulado ao longo dos meses, como também às variações instantâneas, para suprir as demandas de pico e também as variações das fontes intermitentes”.⁶¹

Assim, a EPE já havia avaliado que com a ampliação das fontes intermitentes, seria necessária maior flexibilidade operativa, e que a inserção de fontes específicas para atender os momentos de pico de consumo começaria a se fazer necessária a partir de meados de 2021. Isso seria feito de forma com que “o sistema possua uma parcela da capacidade instalada para ser despachada por poucos momentos, ou seja, com baixo fator de capacidade, ou até mesmo fontes que não agreguem energia, mas consumam em momentos de excesso para gerar nos momentos de necessidade, em menor quantidade devido às perdas do processo”.⁶²

Deste modo, para a viabilização dessas fontes despacháveis, a modalidade de contratação apenas pela quantidade de geração de energia não é suficiente para remunerar os serviços prestados, visto que no quesito de atender aos momentos de pico, ela agrega pouco ou nenhum valor ao sistema.⁶³

Nesse sentido, a Lei Federal n. 14.300, de 6 de janeiro de 2022, denominada “Marco Legal da Microgeração e Minigeração Distribuída”,⁶⁴ já levou em consideração essa situação para as fontes renováveis, ao conceituar e dispor sobre as fontes despacháveis utilizadas na minigeração, particularmente exigindo que no caso da geração fotovoltaica exista um mínimo de 20% (vinte por cento) da capacidade de geração mensal da central geradora a ser

⁶⁰ EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2026**. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-40/PDE2026.pdf> Acesso em: 07 mar. 2022. p. 57.

⁶¹ EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2026**. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-40/PDE2026.pdf> Acesso em: 07 mar. 2022. p. 100.

⁶² EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2026**. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-40/PDE2026.pdf> Acesso em: 07 mar. 2022. p. 101.

⁶³ EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2026**. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-40/PDE2026.pdf> Acesso em: 07 mar. 2022. p. 101.

⁶⁴ BRASIL. CÂMARA DOS DEPUTADOS. **Lei n. 14.300/2022**. Disponível em: <https://www2.camara.leg.br/legin/fed/lei/2022/lei-14300-6-janeiro-2022-792217-veto-164336-pl.html> Acesso em: 20 jan. 2022.

armazenado em baterias, que possam ser despachados aos consumidores finais por meio de um controlador local ou remoto.⁶⁵

Assim, tal qual a Lei Federal n. 14.300/2022, as novas leis e regulamentações que vêm surgindo, buscam integrar e adequar as novas fontes de geração utilizando energia renovável ao contexto já existente no setor elétrico, de modo a permitir o desenvolvimento e a utilização das novas tecnologias, bem como ajustar os aspectos tributários, contratuais e operacionais visando o equilíbrio de custos e necessidades do setor elétrico.

2.2.2 Tarifas de Uso do Sistema de Transmissão (TUST)

O custeio do uso do sistema de transmissão é realizado por meio da aplicação das Tarifas de Uso do Sistema de Transmissão (TUST), conforme Resolução Normativa da Aneel – REN n. 559/2013,⁶⁶ cujos valores são reajustados anualmente no mesmo período em que ocorrem os reajustes da RAP (Receita Anual Permitida)⁶⁷ das concessionárias de transmissão, que inicia em 1º de julho do ano de publicação das tarifas até 30 de junho do ano subsequente. A Receita Anual Permitida (RAP) é a “remuneração que as transmissoras recebem pela prestação do serviço público de transmissão aos usuários. Para as transmissoras que foram licitadas, a RAP é obtida como resultado do próprio leilão de transmissão e é pago às transmissoras a partir da entrada em operação comercial de suas instalações, com revisão a cada quatro ou cinco anos, nos termos dos contratos de concessão”.⁶⁸

O procedimento de cálculo da TUST vem sendo aperfeiçoado ao longo dos anos e até junho de 2013, regulamentavam este procedimento, além da Resolução Aneel n. 281/1999, as Resoluções Normativas n. 117/2004 e n. 267/2007, que traziam regras específicas para o

⁶⁵ BRASIL. CÂMARA DOS DEPUTADOS. **Lei n. 14.300/2022**. Disponível em: <https://www2.camara.leg.br/legin/fed/lei/2022/lei-14300-6-janeiro-2022-792217-veto-164336-pl.html> Acesso em: 20 jan. 2022.

Art. 1º: Para fins e efeitos desta Lei, são adotadas as seguintes definições: [...] IX - fontes despacháveis: as hidrelétricas, incluídas aquelas a fio d'água que possuam viabilidade de controle variável de sua geração de energia, cogeração qualificada, biomassa, biogás e fontes de geração fotovoltaica, limitadas, nesse caso, a 3 MW (três megawatts) de potência instalada, com baterias cujos montantes de energia despachada aos consumidores finais apresentam capacidade de modulação de geração por meio do armazenamento de energia em baterias, em quantidade de, pelo menos, 20% (vinte por cento) da capacidade de geração mensal da central geradora que podem ser despachados por meio de um controlador local ou remoto;

⁶⁶ ANEEL. AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução Normativa n. 559, de 27 de junho de 2013**. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2013559.pdf> Acesso em: 08 mar. 2022.

⁶⁷ ANEEL. AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Cálculo tarifário e metodologias**. Receita Anual Permitida. Disponível em: <https://bit.ly/3xFDHah> Acesso em: 08 mar. 2022.

⁶⁸ ANEEL. AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução Normativa n. 559, de 27 de junho de 2013**. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2013559.pdf> Acesso em: 08 mar. 2022.

cálculo de TUST de geradores. A partir de 28 de junho de 2013, com a publicação da Resolução Normativa n. 559, as TUST passaram a ser calculadas considerando o procedimento nela estabelecido. De maneira geral, “o cálculo da TUST é realizado a partir de simulação do Programa Nodal, que utiliza como dados de entrada a configuração da rede, representada por suas linhas de transmissão, subestações, geração e carga, e a Receita Anual Permitida (RAP) total a ser arrecadada no ciclo”.⁶⁹

2.3 SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA

2.3.1 Configuração

Os sistemas de distribuição de energia elétrica objetivam transportar os grandes fluxos de energia elétrica recebidos pelos sistemas de transmissão de energia elétrica para os consumidores finais, sejam eles indústrias, comércios ou residências. Normalmente a distribuição ocorre dentro das cidades, utilizando redes de distribuição de energia em média voltagem, e através de transformadores distribuídos próximos as unidades consumidoras que abaixam a tensão ou voltagem, para aquela utilizada pelo consumidor, como os popularmente conhecidos 110V ou 220V.

Conforme definição da Aneel, a distribuição de energia “se caracteriza como o segmento do setor elétrico dedicado ao rebaixamento da tensão proveniente do sistema de transmissão, à conexão de centrais geradoras e ao fornecimento de energia elétrica ao consumidor”.⁷⁰

O sistema de distribuição normalmente se inicia com as subestações de distribuição, onde chegam as linhas de alta tensão (superior a 69 kV e inferior a 230 kV) de transmissão de energia, e por meio de dispositivos abaixadores de tensão, normalmente transformadores, reduzem a tensão para média tensão (superior a 1 kV e inferior a 69 kV) e baixa tensão (igual ou inferior a 1 kV). Após passarem pelas subestações, a energia elétrica é distribuída pelas cidades e distritos industriais em média tensão, normalmente utilizando redes trifásicas. Nas regiões onde estão as unidades consumidoras, são instalados transformadores que abaixam ainda mais a tensão, reduzindo da média tensão para a baixa tensão, que é a normalmente

⁶⁹ EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2026**. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-40/PDE2026.pdf> Acesso em: 07 mar. 2022. p. 147.

⁷⁰ ANEEL. AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Regulação dos Serviços de Distribuição**. Disponível em: <https://bit.ly/3Kb8qPn> Acesso em: 10 mar. 2022.

utilizada pelos consumidores. Os transformadores possuem dimensionamento e especificações de potência, que pode justificar um número maior ou menor de transformadores em uma região, conforme a quantidade de energia demandada.⁷¹

A Associação Brasileira de Distribuidores de Energia Elétrica (ABRADEE), explica que o “sistema de distribuição de energia é aquele que se confunde com a própria topografia das cidades, ramificado ao longo de ruas e avenidas para conectar fisicamente o sistema de transmissão, ou mesmo unidades geradoras de médio e pequeno porte, aos consumidores finais da energia elétrica”.⁷²

Isso significa que praticamente todos os serviços percebidos pelos consumidores finais de energia elétrica são realizados pelas distribuidoras, tais como o atendimento para a solicitação da ligação de energia, a conexão propriamente dita e a entrega efetiva de energia elétrica ao consumidor do ambiente regulado. A energia fornecida pelas distribuidoras, portanto, “é a energia efetivamente entregue aos consumidores conectados à rede elétrica de uma determinada empresa de distribuição, podendo ser rede de tipo aérea (suportada por postes) ou de tipo subterrânea (com cabos ou fios localizados sob o solo, dentro de dutos subterrâneos)”.⁷³

Conforme estatística da ABRADEE, do total da energia distribuída no Brasil, o setor privado é responsável pela distribuição de aproximadamente 60% da energia, enquanto as empresas públicas se responsabilizam por aproximadamente 40%. O Brasil contava em 2019 com mais de 85 milhões de Unidades Consumidoras (UC), com medição de energia individualizada e correspondente a um único consumidor, sendo 85% delas residenciais.⁷⁴

⁷¹ ANEEL. AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Regulação dos Serviços de Distribuição**. Disponível em: <https://bit.ly/3Kb8qPn> Acesso em: 10 mar. 2022.

⁷² ABRADEE. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE DISTRIBUIDORES DE ENERGIA ELÉTRICA. **A distribuição de energia**. Disponível em: <https://www.abradee.org.br/setor-de-distribuicao/a-distribuicao-de-energia/> Acesso em: 10 mar. 2022.

⁷³ ABRADEE. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE DISTRIBUIDORES DE ENERGIA ELÉTRICA. **A distribuição de energia**. Disponível em: <https://www.abradee.org.br/setor-de-distribuicao/a-distribuicao-de-energia/> Acesso em: 10 mar. 2022.

⁷⁴ ABRADEE. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE DISTRIBUIDORES DE ENERGIA ELÉTRICA. **A distribuição de energia**. Disponível em: <https://www.abradee.org.br/setor-de-distribuicao/a-distribuicao-de-energia/> Acesso em: 10 mar. 2022.

2.3.2 Regulamentação da distribuição de energia elétrica

A Aneel, através de resoluções, portarias e outras normas de funcionamento para as distribuidoras, realiza a regulação do setor de distribuição de energia. Até recentemente, um dos referenciais para o setor de distribuição era a Resolução 414 de 2010,⁷⁵ que esclarecia para os consumidores e demais agentes do setor elétrico, o que é a distribuição, conceitos-chave, normas de funcionamento, cobrança e atendimento. Essa resolução foi recentemente revogada pela Resolução 1.000 de 07 de dezembro de 2021,⁷⁶ que trouxe uma nova consolidação da regulação aplicável às distribuidoras de energia elétrica, e revogou normativas anteriores, sendo revogadas as Resoluções Normativas Aneel n. 414, de 9 de setembro de 2010; n. 470, de 13 de dezembro de 2011; e n. 901, de 8 de dezembro de 2020.

A referida Resolução 1.000/2021 da Aneel, trouxe várias novidades aos consumidores de energia elétrica e algumas novas obrigações às distribuidoras de energia elétrica, sendo que a maioria delas inicia sua vigência em 01 de abril de 2022, tais como:

Ressarcimento de danos a equipamentos: O prazo para o consumidor pedir à distribuidora o ressarcimento do valor pago por equipamentos danificados devido a falhas no fornecimento de energia será de até cinco anos, além do que, também terá o direito de consertar o seu equipamento, por sua conta e risco, e sem autorização da distribuidora.⁷⁷

Mudança para imóvel com a conta de luz atrasada: Explicitou a situação na qual o ocupante anterior de um imóvel deixou contas de luz em atraso, que não poderão ser cobradas do novo ocupante como condição para transferir a titularidade, nem exigir que ele assine qualquer documento se responsabilizando pela quitação. A dívida pertencerá ao titular da conta em atraso e não ao imóvel.⁷⁸

Simplificação de prazos para conexão à rede: A Lei Federal n. 14.195, de 26 de agosto de 2021,⁷⁹ que trata da política da modernização do ambiente de negócios no Brasil e contém um capítulo sobre a obtenção de eletricidade, prevê a conexão em até 45 dias para

⁷⁵ ANEEL. AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução Normativa n. 414, de 9 de setembro de 2010.** Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2010414.pdf> Acesso em: 10 mar. 2022.

⁷⁶ ANEEL. AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução Normativa n. 1.000, de 7 de dezembro de 2021.** Disponível em: <https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren20211000.pdf> Acesso em: 12 fev. 2022.

⁷⁷ CANALSOLAR. **Resolução n. 1.000 da Aneel é publicada e revoga REN 414.** Disponível em: <https://bit.ly/3vwZ4rS> Acesso em: 10 mar. 2022.

⁷⁸ CANALSOLAR. **Resolução n. 1.000 da Aneel é publicada e revoga REN 414.** Disponível em: <https://bit.ly/3vwZ4rS> Acesso em: 10 mar. 2022.

⁷⁹ BRASIL. CÂMARA DOS DEPUTADOS. **Lei n. 14.195, de 26 de agosto de 2021.** Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2021/lei/L14195.htm Acesso em: 10 mar. 2022.

unidades com potência contratada de até 140 kVA, em área urbana, com distância de até 150 metros da rede⁸⁰ e onde não haja a necessidade de obras de ampliação, de reforço ou de melhoria no sistema de distribuição.⁸¹

Devolução de cobrança feita pela distribuidora indevidamente: Em caso de cobrança indevida de um valor maior do consumidor, deverá ser devolvida em dobro, exceto nos casos em que a cobrança indevida ocorrer por responsabilidade exclusiva do consumidor ou de terceiros não relacionados à distribuidora, quando será devolvido o mesmo valor.⁸²

Vedação de corte da energia nos finais de semana e feriados: Não poderá mais ocorrer a suspensão do fornecimento de energia por falta de pagamento na sexta-feira, no sábado ou no domingo, bem como em feriados ou véspera de feriado, devendo ainda a distribuidora comunicar ao consumidor o dia inicial da suspensão de fornecimento.⁸³

⁸⁰ BRASIL. CÂMARA DOS DEPUTADOS. **Lei n. 14.195, de 26 de agosto de 2021.** Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2021/lei/L14195.htm Acesso em: 10 mar. 2022.

[...] **CAPÍTULO VIII – DA OBTENÇÃO DE ELETRICIDADE. Art. 35:** Na execução de obras de extensão de redes aéreas de distribuição de responsabilidade da concessionária ou permissionária de serviço público de distribuição de energia elétrica, a licença ou autorização para realização de obras em vias públicas, quando for exigida e não houver prazo estabelecido pelo poder público local, será emitida pelo órgão público competente no prazo de 5 (cinco) dias úteis, contado da data de apresentação do requerimento. § 1º Na hipótese de não haver decisão do órgão competente após o encerramento do prazo estabelecido no caput deste artigo ou na legislação local, a concessionária ou permissionária de serviço público de distribuição de energia elétrica ficará autorizada a realizar a obra em conformidade com as condições estabelecidas no requerimento apresentado, observada a legislação aplicável. § 2º Na hipótese de descumprimento das condições estabelecidas no requerimento ou na legislação aplicável, o órgão público poderá cassar, a qualquer tempo, a licença ou autorização a que se refere o § 1º deste artigo, assegurado o direito à ampla defesa e ao contraditório à concessionária ou permissionária. § 3º O disposto neste artigo aplica-se exclusivamente às solicitações de conexão, com potência contratada de até 140 kVA (cento e quarenta quilovolts-amperes), desde que não haja a necessidade de realização de obras de ampliação, de reforço ou de melhoria no sistema de distribuição de energia elétrica existente, e que:

I - em área urbana, a distância até a rede de distribuição mais próxima seja de, no máximo, 150 m (cento e cinquenta metros); II - em área semiurbana e rural, a distância até a rede de distribuição mais próxima seja de, no máximo, 1.000 m (mil metros). **Art. 36:** A obtenção da eletricidade deve ser solicitada à concessionária ou permissionária local que presta o serviço público de distribuição de energia elétrica no Município do solicitante e observará as seguintes condições: I - os procedimentos necessários para a obtenção da eletricidade, desde a solicitação até o início do fornecimento, devem ser realizados em até 45 (quarenta e cinco) dias para as unidades consumidoras em área urbana, enquadradas no Grupo A e que respeitem as condições previstas no inciso I do § 3º do art. 35 desta Lei; e II - os procedimentos necessários para a obtenção de eletricidade para os demais casos não previstos no inciso I deste caput devem atender aos prazos e condições regulamentados pela Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel). **Art. 37:** Para a obtenção da eletricidade de que trata o inciso I do caput do art. 36 desta Lei, o projeto e a execução das instalações elétricas internas do imóvel deverão possuir responsável técnico, que responderá administrativa, civil e criminalmente em caso de danos e de acidentes decorrentes de eventuais erros de projeto ou de execução, dispensada a exigibilidade de: I - (VETADO); e II - aprovação prévia de projeto pela concessionária ou permissionária local. Parágrafo único. O responsável técnico deverá fornecer, no pedido de obtenção de eletricidade, seu número de registro válido no conselho profissional competente.

⁸¹ CANALSOLAR. **Resolução n. 1.000 da Aneel é publicada e revoga REN 414.** Disponível em: <https://bit.ly/3vwZ4rS> Acesso em: 10 mar. 2022.

⁸² CANALSOLAR. **Resolução n. 1.000 da Aneel é publicada e revoga REN 414.** Disponível em: <https://bit.ly/3vwZ4rS> Acesso em: 10 mar. 2022.

⁸³ CANALSOLAR. **Resolução n. 1.000 da Aneel é publicada e revoga REN 414.** Disponível em: <https://bit.ly/3vwZ4rS> Acesso em: 10 mar. 2022.

Atendimento ao consumidor: A Resolução 1.000 possibilita novas formas de atendimento, tal como vídeo-chamada, internet, *chat*, e-mail e reclamação na plataforma Consumidor.gov do Ministério da Justiça, cuja adesão será obrigatória para todas as distribuidoras, com geração de protocolo obrigatória em todos os canais de atendimento.⁸⁴

2.3.3 Tarifa de Uso do Sistema de Distribuição (TUSD)

A definição da Tarifa de Uso do Sistema de Distribuição (TUSD) está contida na Resolução 1.000/2021 da Aneel,⁸⁵ em seu art. 2º, XLIX, ‘b’, que o define como o valor monetário unitário determinado pela Aneel, em R\$/MWh (reais por megawatt-hora) ou em R\$/kW (reais por quilowatt), utilizado para o faturamento mensal do consumidor e demais usuários do sistema de distribuição de energia elétrica pelo uso do sistema.

Ou seja, o valor da TUSD é diretamente proporcional ao consumo de energia elétrica, constituindo em um valor determinado pela Aneel, que multiplicado pelo consumo de energia, resulta no valor da tarifa a ser recolhida.

A justificativa para a TUSD consiste no custeio da execução e manutenção da infraestrutura necessária para realizar a distribuição de energia, que assim é tarifada proporcionalmente ao consumo, de forma que aquele consumidor que mais demanda energia, mais estará custeando a infraestrutura necessária para a distribuição.

Dentre os valores que constituem a TUSD estão incluídos o serviço de transmissão (TUSD – Fio A), o serviço de distribuição (TUSD – Fio B), encargos do próprio sistema de distribuição (TUSD – Encargos do Serviço de Distribuição), perdas elétricas técnicas e não técnicas (TUSD – Perdas Técnicas; e TUSD – Perdas Não Técnicas), a Conta de Consumo de Combustíveis – CCC (TUSD – CCC S/SE/CO, TUSD – CCC N/NE e TUSD – CCC Isolados), a Conta de Desenvolvimento Energético – CDE (TUSD – CDE S/SE/CO e TUSD – CDE N/NE) e o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica – PROINFA.⁸⁶

⁸⁴ CANALSOLAR. **Resolução n. 1.000 da Aneel é publicada e revoga REN 414.** Disponível em: <https://bit.ly/3vwZ4rS> Acesso em: 10 mar. 2022.

⁸⁵ ANEEL. AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução Normativa n. 1.000, de 7 de dezembro de 2021.** Disponível em: <https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren20211000.pdf> Acesso em: 12 fev. 2022.

⁸⁶ ANEEL. AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Componentes da Tarifa de Uso dos Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica – TUSD.** Disponível em: <https://bit.ly/3rCys7z> Acesso em: 22 jan. 2022.

2.4 EVOLUÇÃO TECNOLÓGICA DO SETOR ELÉTRICO

A denominada Quarta Revolução Industrial (4RI),⁸⁷ em função da sua escala, alcance e complexidade, está levando a uma transformação de toda a humanidade. Significativas alterações no ponto de equilíbrio da eficiência econômica estão sendo promovidas pela 4RI, que vai se modificando enquanto as tecnologias vão modificando as relações de trabalho, as demandas de produtos e serviços, e até mesmo as relações governamentais.

A convergência tecnológica promovida pela 4RI vem apresentando soluções de geração de energia com menor impacto ambiental que as tradicionalmente utilizadas, em especial sem o uso de combustíveis fósseis e a consequente emissão de carbono na atmosfera, onde se destaca a geração de energia eólica e por painéis solares.

O armazenamento em banco de dados digitalizados das informações de geração, armazenamento e consumo de energia, apoiado por uma infraestrutura tecnológica de computação e comunicação de dados – tem possibilitado o surgimento de soluções inovadoras na área de energia elétrica. Cita-se como exemplo os Recursos Energéticos Distribuídos (REDs), que permitem a descentralização da geração e a ampliação das possibilidades de utilização de energia renovável e sem emissão de carbono.

Valendo-se das inovações tecnológicas e na compreensão da importância da sustentabilidade dos processos, questão que obteve grande visibilidade e apoio político pela Agenda 2030,⁸⁸ o setor elétrico já iniciou sua transformação, com base em três valores: descarbonização, descentralização e digitalização.

Em dezembro de 2015 foi assinado o Acordo de Paris, onde mais de 130 países membros ratificaram o documento, incluídos todos os países membros da ONU, e assim adotaram a Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável. O motivo para este consenso é o reconhecimento que a implementação da Agenda 2030 caminha de mãos dadas com a limitação do aumento da temperatura global e da resiliência climática.⁸⁹

A descarbonização é uma importante etapa dessa agenda no setor elétrico, pois a redução das emissões de gases de efeito estufa possibilita um futuro mais saudável para as próximas gerações. O maior impacto desta tendência mundial é a gradual substituição de

⁸⁷ SCHWAB, Klaus. **The Fourth Industrial Revolution**. World Economic Forum, 2016. Geneva.

⁸⁸ OBJETIVOS DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL. **Transformando Nosso Mundo – A Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável**. Disponível em: <https://odsbrasil.gov.br/home/agenda> Acesso em: 03 mar. 2022.

⁸⁹ NAÇÕES UNIDAS. **ONU pede comprometimento com Acordo de Paris sobre o clima**. Disponível em: <https://nacoesunidas.org/onu-pede-comprometimento-com-acordo-de-paris-clima/> Acesso em: 03 nov. 2019.

energia oriunda de combustíveis fósseis por energia elétrica em diversos produtos, a exemplo dos veículos elétricos.⁹⁰

Políticas públicas estão sendo propostas nesse sentido nos países signatários do Acordo de Paris. No Brasil, Santos⁹¹ explica que “um dos principais objetivos da nossa proposta de modernização do setor elétrico é garantir estabilidade regulatória e jurídica, além de previsibilidade neste mercado – fator fundamental para atração de investimentos” e que “a expectativa de crescimento da economia, em torno de 2,8% ao ano, cria a necessidade de uma oferta de 5 gigawatts de energia. Para atender a essa demanda, o governo deve estimular a geração a partir de fontes eólica e fotovoltaica”.⁹²

O uso dessas fontes de energia limpa e renovável tornará o setor elétrico muito mais descentralizado, com um grande número de fontes de energia distribuída e prosumidores conectados a redes de distribuição. Estes acabarão por gerenciar seus próprios sistemas, com uma combinação de geração, uso e armazenamento de energia, denominados Recursos Energéticos Distribuídos (REDs).⁹³

O uso da energia eólica e solar fotovoltaica deixaram de ser uma promessa e transformaram-se numa realidade, e avança no sentido de ser quase obrigatória na matriz energética dos países por todo o mundo. As previsões apontam que a energia solar se tornará majoritária na matriz energética brasileira entre os anos 2035 e 2040. O maior impacto dessa mudança é a descentralização, que vai implicar em diversas mudanças culturais e operacionais nas empresas operadoras. Dessa descentralização vão surgir novos modelos de negócios, novos produtos, novos serviços inovadores de distribuição e comercialização de energia, adaptados à Quarta Revolução Industrial (4RI).⁹⁴

⁹⁰ CEMIG. **Plano estratégico de inovação de tecnologia digital da Cemig (versão reduzida)**. Disponível em: <https://bit.ly/38dSTkb> Acesso em: 03 nov. 2019.

⁹¹ SANTOS, Reive Barros dos. **Painel debate transição energética e digitalização do setor elétrico**. Publicado em: 24 de julho de 2019. In: Portal ABINEE – Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica. Disponível em: <http://www.abinee.org.br/noticias/com53.htm> Acesso em: 03 nov. 2019.

⁹² ABINEE. **Painel debate transição energética e digitalização do setor elétrico**. Publicado em: 24/07/2019. Disponível em: <http://www.abinee.org.br/noticias/com53.htm> Acesso em: 03 nov. 2019.

⁹³ CEMIG. **Plano estratégico de inovação de tecnologia digital da Cemig (versão reduzida)**. Disponível em: <https://bit.ly/38dSTkb> Acesso em: 03 nov. 2019.

⁹⁴ CEMIG. **Plano estratégico de inovação de tecnologia digital da Cemig (versão reduzida)**. Disponível em: <https://bit.ly/38dSTkb> Acesso em: 03 nov. 2019.

3 REGULAÇÃO BRASILEIRA DO SETOR ELÉTRICO

A legislação básica do setor elétrico brasileiro se consolidou ao longo de quase 70 anos de história. “É uma soma de artigos da Constituição, leis complementares e ordinárias, decretos, portarias interministeriais, portarias do Ministério de Minas e Energia e do extinto Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica (DNAEE), resoluções da Aneel, conjuntas e CONAMA”.⁹⁵ Quando se esgotou o papel do Estado investidor, surgiram os marcos da modernização do setor, que são a Lei de Concessões de Serviços Públicos, de fevereiro de 1995 e a Lei n. 9.427/1996, que tratou da criação da Aneel – Agência Nacional de Energia Elétrica.

A Aneel regularmente emite e publica no Diário Oficial da União Resoluções Normativas voltadas as atividades do setor de energia elétrica. Estas resoluções são numeradas sequencialmente e são “atos regulamentares de alcance ou interesse geral, voltados às atividades do setor elétrico e têm por objeto o estabelecimento de diretrizes, obrigações, encargos, condições, limites, regras, procedimentos, requisitos ou quaisquer direitos e deveres dos agentes e usuários desse serviço público”.⁹⁶

3.1 GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

Foi por uma dessas Resoluções Normativas da Aneel, a de n. 482/2012 de 17 de abril de 2012, que foi regulamentada no Brasil a geração distribuída (GD), e desde então o “consumidor brasileiro pode gerar sua própria energia elétrica a partir de fontes renováveis ou cogeração qualificada e inclusive fornecer o excedente para a rede de distribuição de sua localidade. Trata-se da micro e da minigeração distribuídas de energia elétrica, inovações que podem aliar economia financeira, consciência socioambiental e autossustentabilidade”.⁹⁷

Posteriormente, objetivando reduzir os custos e o tempo para a conexão da microgeração e minigeração; “compatibilizar o Sistema de Compensação de Energia Elétrica com as Condições Gerais de Fornecimento (Resolução Normativa n. 414/2010); aumentar o público alvo; e melhorar as informações na fatura, a Aneel publicou a Resolução Normativa

⁹⁵ ANEEL. AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Informações Técnicas. Legislação.** Disponível em: <https://www2.aneel.gov.br/area.cfm?idArea=50&idPerfil=2> Acesso em: 08 nov. 2019.

⁹⁶ ANEEL. AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Informações Técnicas. Legislação.** Disponível em: <https://www2.aneel.gov.br/area.cfm?idArea=50&idPerfil=2> Acesso em: 08 nov. 2019.

⁹⁷ ANEEL. AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Geração Distribuída.** Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/geracao-distribuida> Acesso em 08 nov. 2019.

n. 687/2015 revisando a Resolução Normativa n. 482/2012”.⁹⁸ A introdução dessas novas regras começou a valer em 1º de março de 2016, autorizando o uso de qualquer fonte renovável ou cogeração qualificada, “denominando-se microgeração distribuída a central geradora com potência instalada até 75 quilowatts (KW) e minigeração distribuída aquela com potência acima de 75 kW e menor ou igual a 5 MW, conectadas na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras”,⁹⁹ já atualizada pela Resolução Normativa n. 786/2017.

Com essa normativa, estabeleceu-se que quando houver um excedente de geração de energia em determinado mês, o consumidor fica com créditos que podem ser compensados nos meses seguintes, de forma a reduzir a fatura de energia elétrica, dentro de um prazo máximo de sessenta meses. Esse crédito pode ser utilizado para compensar as faturas no próprio local de geração ou nas unidades consumidoras (UC) do mesmo titular localizadas em local distinto, mas na área de atendimento da mesma distribuidora, esta utilização denomina-se “autoconsumo remoto”.¹⁰⁰ Também houve a previsão do uso em condomínio, onde a geração pode ser aproveitada para reduzir as tarifas da UC da área de uso comum, bem como de um percentual da tarifa de cada uma das UC pertencentes à edificação do próprio condomínio, modalidade que foi denominada de “empreendimento com múltiplas unidades consumidoras”.¹⁰¹ E, finalmente, houve a possibilidade denominada de “geração compartilhada”, caracterizada pela reunião de consumidores por meio de um consórcio ou cooperativa, com microgeração ou minigeração distribuída em local diferente das UC nas quais a energia excedente será compensada.¹⁰²

Com essa regulação, a Aneel pretendeu fomentar uma transição gradual para a geração distribuída utilizando energia renovável, de forma que o mercado não fosse bruscamente impactado. Tratou-se de “uma mudança de paradigma no setor, de um sistema que era

⁹⁸ ANEEL. AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Geração Distribuída**. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/geracao-distribuida> Acesso em 08 nov. 2019.

⁹⁹ ANEEL. AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Geração Distribuída**. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/geracao-distribuida> Acesso em 08 nov. 2019.

¹⁰⁰ ANEEL. AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução Normativa n. 482, de 17 de abril de 2012**. Art. 2º, VI. Art. 7º. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf> Acesso em: 08 mar. 2022.

¹⁰¹ ANEEL. AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução Normativa n. 482, de 17 de abril de 2012**. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf> Acesso em: 08 mar. 2022.

¹⁰² ANEEL. AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução Normativa n. 482, de 17 de abril de 2012**. Art. 2º, VI. Art. 7º. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf> Acesso em: 08 mar. 2022.

puramente centralizado para um distribuído, de planejamento energético”.¹⁰³ Nesse sentido, a Aneel tem promovido atualizações nessa regulação, fazendo ajustes que equilibrem os incentivos para investimento em GD com formas de minimizar os impactos no mercado de energia.¹⁰⁴

Blanchet e Oliveira¹⁰⁵ explicam que a extrafiscalidade ambiental é uma forma de induzir condutas benéficas de proteção ecológica, e a energia elétrica representa significativos recursos ao Estado através de sua tributação, que pode trazer efeitos indesejados ao desenvolvimento sustentável se indevidamente utilizada. Com base na análise constitucional e nas experiências internacionais, os autores concluem que “além de oportuna, uma reforma tributária nacional com preocupação ambiental é necessária e urgente, não apenas pelo mero aspecto ambiental que a legitima, mas pelo chamado duplo dividendo; resultados financeiros e ambientais, além do caráter de inovação e de oportunidade empresarial relacionados a chamada hipótese de Porter no texto tratada”.

No contexto desse cenário de evolução da GD, algumas políticas de incentivo vinham sendo discutidas e possibilidades vinham sendo avaliadas de revisões ou reduções, como no caso da compensação integral dos créditos de energia, que poderiam levar as tarifas a serem majoradas em índices entre 28% a 63% do valor do kWh (quilowatt hora), conforme o modelo a ser escolhido, passando o prosumidor a arcar com diferentes componentes da tarifa.¹⁰⁶

¹⁰³ GRIDHUB. **Mudanças propostas em revisão de REN 482 geram divergências.** Disponível em: https://www.griclub.org/news/infrastructure/mudancas-propostas-em-revisao-de-ren-482-geram-divergencias_933.html Acesso em: 08 nov. 2019.

¹⁰⁴ ANEEL. AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Revisão das regras aplicáveis à micro e minigeração distribuída.** Relatório de Análise de Impacto Regulatório n. 0004/2018-SRD/SCG/SMA/Aneel. Brasília, 06/12/2018. Versão nº 1, Pré-Participação Pública. Disponível em: <https://static.poder360.com.br/2020/01/aneel-proposta.pdf> Acesso em: 03 out. 2020 [p. 9].

¹⁰⁵ BLANCHET, Luiz Alberto; OLIVEIRA, Edson Luciani de. Tributação da energia no brasil: necessidade de uma preocupação constitucional extrafiscal e ambiental. **Sequência** (Florianópolis), n. 68, p. 159-187, jun. 2014. Disponível em: <https://periodicos.ufsc.br/index.php/sequencia/article/view/2177-7055.2013v35n68p159> Acesso em: 03 fev. 2022.

¹⁰⁶ “Nas alternativas propostas, a Aneel considera diferentes componentes da tarifa. Além da alternativa 0, que mantém o sistema exatamente como é atualmente, há outras cinco: na primeira, o consumidor com geração própria paga pelo valor correspondente ao transporte e à distribuição da energia que foi consumida (equivalente a cerca de 28% do kWh); na segunda, ele passaria a pagar por todo o transporte, o que equivale, em média, a 34% do valor do kWh utilizado; a alternativa três considera o pagamento da parcela do transporte e dos encargos, o que corresponde, em média, a um total de 41% do valor do kWh utilizado; já na opção quatro, além dos custos das demais alternativas, o consumidor também arcaria com as perdas no transporte de energia, o que representaria cerca de 49% do valor do kWh utilizado; e, por fim, na alternativa cinco, o consumidor com geração distribuída paga por todos os componentes tarifários com exceção da parcela correspondente à compra de energia. Essa última proposta equivale ao pagamento de aproximadamente 63% do valor do kWh utilizado”. GRIDHUB. **Mudanças propostas em revisão de REN 482 geram divergências.** Disponível em: https://www.griclub.org/news/infrastructure/mudancas-propostas-em-revisao-de-ren-482-geram-divergencias_933.html Acesso em: 08 nov. 2019.

A ideia debatida e proposta, especialmente pelos grupos ligados às distribuidoras de energia, seria a de que os custos da infraestrutura de transmissão e distribuição fossem repassados ao prosumidor, que arcaria com a Tarifa de Uso do Sistema de Distribuição (TUSD) e a Tarifa de Uso do Sistema de Transmissão (TUST),¹⁰⁷ reduzindo assim gradualmente os incentivos à GD e evitando que esses custos acabassem sendo assumidos pelos demais consumidores que não possuem GD, especialmente nos casos de autoconsumo remoto, onde os custos são maiores.¹⁰⁸

Esses debates acabaram ocupando o noticiário político,¹⁰⁹ com narrativas construídas pelos grupos de interesse em confronto. Os defensores da manutenção do incentivo existente à GD alegavam que a legislação proposta pretendia “taxar o sol”, enquanto os opositores à manutenção desse incentivo alegavam que os consumidores mais pobres, que não tinham recursos para adquirir sistemas fotovoltaicos de GD, estavam custeando esses benefícios dos possuidores de sistemas de GD.

A ampliação do número de ligações de GD, em conjunto com os debates sobre esse tema, levou a que recentemente, em 7 de dezembro de 2021, fosse publicada a Resolução Normativa n. 1000 da Aneel, que revogou e modificou várias das resoluções existentes, trazendo assim várias modificações no tocante aos direitos e deveres do consumidor e dos

¹⁰⁷ ANEEL. AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Nota Técnica n. 0020/2012-SRD/ANEEL.** Disponível em: <https://bit.ly/3jX0sP4> Acesso em: 09 nov. 2019.

¹⁰⁸ Os resultados mostram que, para o caso da micro e minigeração local (compensação integral dos créditos no mesmo endereço onde a energia é gerada), a manutenção das regras atuais indefinidamente pode levar a custos elevados para os consumidores que optarem por não instalar geração própria. Contudo, os cálculos apontam que seria possível manter a Alternativa 0 até que o mercado de micro e minigeração distribuída (GD) local se consolide, com a instalação de 3,365 GW em todo país para, em seguida, alterar o Sistema de Compensação de modo a que a TUSD Fio B deixe de ser compensada (Alternativa 1). No cenário proposto nesta AIR, estima-se que seria atingida a marca de 17 GW de micro e minigeração local em 2035, implicando na redução de quase 60 milhões de toneladas de CO₂ e na geração de cerca de 433 mil empregos. Já no que tange à geração instalada em unidades consumidoras para compensação remota, os cálculos da AIR mostram que a manutenção das regras atualmente vigentes por um longo prazo pode levar a custos de mais de 68 bilhões de reais para os usuários. Esses custos seriam reduzidos em 98% com a adoção da Alternativa 3 a partir de 2020. Contudo, para evitar que houvesse uma interrupção no desenvolvimento do mercado, foi analisado um cenário de transição que permitiria a manutenção das regras atualmente vigentes por mais alguns anos, alterando a forma de compensação para a Alternativa 1 quando o mercado estivesse mais consolidado (na marca da 1,25 GW de potência no país) e, em um segundo momento (quando a GD remota representasse 2,13 GW), passaria a ser aplicada a Alternativa 3. Esse cenário, em que pese sua maior complexidade operacional, permitiria a evolução gradual do mercado de geração distribuída, com impactos reduzidos para os demais consumidores. Nesse caso, estima-se que, no final do período de análise, haveria uma potência total de mais de 4,5 GW somente em sistemas de compensação remota. In: ANEEL. AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Revisão das regras aplicáveis à micro e minigeração distribuída.** Relatório de Análise de Impacto Regulatório n. 0004/2018-SRD/SCG/SMA/Aneel. Brasília, 06/12/2018. Versão nº 1, Pré-Participação Pública. Disponível em: <https://static.poder360.com.br/2020/01/aneel-proposta.pdf> Acesso em: 03 out. 2020 [p. 4; 58].

¹⁰⁹ ALBAENERGIA. **Taxar o sol:** governo volta a discutir imposto sobre energia solar. Publicado em: 25/06/2021. Disponível em: <https://albaenergia.com.br/taxar-o-sol-governo-volta-a-discutir-imposto-sobre-energia-solar/> Acesso em: 10 jul. 2021.

demais usuários do serviço público de distribuição de energia, definindo assim as responsabilidades dos agentes e os procedimentos a serem seguidos pelos consumidores.¹¹⁰

No mesmo sentido, o Projeto de Lei n. 5829/2019¹¹¹ surgiu desse debate, buscando instituir o Marco Legal da Microgeração e Minigeração distribuída, o Sistema de Compensação de Energia Elétrica (SCEE) e o Programa de Energia Renovável Social (PERS). O autor desse projeto de lei, deputado Silas Câmara, argumentou que “para que esse modelo de geração, proveniente de fontes renováveis, continue crescendo e trazendo benefícios para o País, com grande geração de empregos, benefícios ambientais e para o setor elétrico, é importante existir um arcabouço legal que garanta segurança jurídica e os recursos necessários para seu desenvolvimento”.¹¹²

Desse projeto de lei, resultou a Lei Federal n. 14.300, de 6 de janeiro de 2022, denominada “Marco Legal da Microgeração e Minigeração Distribuída”,¹¹³ que também trouxe o Sistema de Compensação de Energia Elétrica (SCEE) e o Programa de Energia Renovável Social (PERS). Dessa forma, a criação por lei federal do “Marco Legal da Microgeração e Minigeração Distribuída”, trouxe segurança jurídica muito superior do que as normativas da Aneel, e por consequência, menores riscos regulatórios aos envolvidos, sejam consumidores, fornecedores ou distribuidoras.

3.2 LEI N. 14.300/2022 – MARCO LEGAL DA MICROGERAÇÃO E MINIGERAÇÃO DISTRIBUÍDA

A Lei n. 14.300/2022 entrou em vigor no dia 7 de janeiro de 2022, com sua publicação no DOU (Diário Oficial da União), após sanção, com vetos, do presidente Jair Bolsonaro. Contudo, essa legislação prevê um período de transição para os projetos solicitados em até 12 meses contados da publicação da lei. Assim, haverá um período de vacância, no qual “todos os projetos de GD, já instalados ou cuja solicitação de acesso ocorram até o dia 7 de janeiro

¹¹⁰ ANEEL. AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução Normativa n. 1.000, de 7 de dezembro de 2021**. Disponível em: <https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren20211000.pdf> Acesso em: 12 fev. 2022.

¹¹¹ BRASIL. CÂMARA DOS DEPUTADOS. **Projeto de Lei n. 5829/2019**. Disponível em: <https://www.camara.leg.br/propostas-legislativas/2228151> Acesso em: 10 jul. 2021.

¹¹² BRASIL. CÂMARA DOS DEPUTADOS. **Projeto cobra encargos de distribuição de micro e minigeração de energia elétrica**. Publicado em: 17/01/2020, no portal Agência Câmara de Notícias. Disponível em: <https://www.camara.leg.br/noticias/631158-projeto-cobra-encargos-de-distribuicao-de-micro-e-minigeracao-de-energia-eletrica/> Acesso em: 10 jul. 2021.

¹¹³ BRASIL. CÂMARA DOS DEPUTADOS. **Lei n. 14.300, de 6 de janeiro de 2022: Marco Legal da Microgeração e Minigeração Distribuída**. Disponível em: <https://www2.camara.leg.br/legin/fed/lei/2022/lei-14300-6-janeiro-2022-792217-norma-pl.html> Acesso em: 20 jan. 2022.

de 2023, serão válidos nas regras atuais de compensação previstas na Resolução n. 482 (Resolução Normativa n. 482/2012), até o dia 31 de dezembro de 2045”.¹¹⁴

Preliminarmente, cabe esclarecer que houve dois vetos presidenciais à lei, sendo eles a retirada da possibilidade de loteamento de usina solar flutuante,¹¹⁵ sobre a qual Pedro Dante explica que “a planta fotovoltaica flutuante é uma ótima ideia. É um tipo de usina híbrida, e a tendência é que a mesma seja utilizada no Brasil. Entretanto, foi entendido que não considerar este loteamento seria uma forma de burlar o limite legal do tamanho das usinas. Então, com base neste fundamento, consequentemente, foi vetado tal dispositivo”.¹¹⁶

O segundo veto tratou da retirada do enquadramento de projetos de micro e mini GD em programas como o REIDI (Regime Especial de Incentivos para o Desenvolvimento da Infraestrutura), FIP (Fundos de Investimento em Participação) e debêntures incentivadas,¹¹⁷ e

¹¹⁴ CANALSOLAR. **Lei 14.300**: principais mudanças do Marco Legal da GD. Disponível em: <https://canalsolar.com.br/lei-14-300-principais-mudancas-do-marco-legal-da-gd/> Acesso em: 20 jan. 2022.

¹¹⁵ “Ouvidos, o Ministério de Minas e Energia e o Ministério da Economia manifestaram-se pelo veto ao seguinte dispositivo do Projeto de Lei: § 3º do art. 11; “§ 3º A vedação de que trata o § 2º deste artigo não se aplica às unidades flutuantes de geração fotovoltaica instaladas sobre a superfície de lâmina d’água de reservatórios hídricos, represas e lagos, naturais e artificiais, desde que cada unidade observe o limite máximo de potência instalada de microgeração ou minigeração distribuída, disponha de equipamentos inversores, transformadores e medidores autônomos com identificação georreferenciada específica, e tenha requerido o acesso perante a concessionária ou permissionária de distribuição de energia elétrica da mesma área de concessão ou permissão que atenderá a unidade consumidora beneficiária da energia”; Razões do veto; “A proposição legislativa estabelece exceção à vedação de divisão de central geradora em unidades de menor porte para se enquadrar nos limites de potência para microgeração ou minigeração distribuída às usinas flutuantes de geração fotovoltaica instaladas sobre a superfície de lâmina d’água de reservatórios hídricos, represas e lagos, naturais e artificiais, desde que cada unidade observasse o limite máximo de potência instalada de microgeração ou minigeração distribuída, dispusesse de equipamentos inversores, transformadores e medidores autônomos com identificação georreferenciada específica, e tivesse requerido o acesso perante a concessionária ou permissionária de distribuição de energia elétrica da mesma área de concessão ou permissão que atenderia a unidade consumidora beneficiária da energia. Entretanto, a despeito da boa intenção do legislador, a proposição legislativa contraria o interesse público, tendo em vista que permitiria que grandes projetos instalados sobre lâmina d’água fracionassem suas unidades, de modo que se enquadrariam formalmente como microgeradores ou minigeradores, o que implicaria a transferência de mais custos aos consumidores cativos sem geração distribuída. Mencione-se, ainda, que esse benefício teria caráter regressivo, pois oneraria os demais consumidores, inclusive os de baixa renda, em favor de empreendimentos acessíveis apenas a grandes investidores. Ademais, em que pese o mecanismo representar incentivo para a implantação de energia renovável, essa caracterização distorce o modelo setorial, acarretando custos adicionais aos consumidores, da ordem de R\$ 7 bilhões”. In: BRASIL. CÂMARA DOS DEPUTADOS. **Lei n. 14.300, de 6 de janeiro de 2022**: Marco Legal da Microgeração e Minigeração Distribuída. Disponível em: <https://www2.camara.leg.br/legin/fed/lei/2022/lei-14300-6-janeiro-2022-792217-norma-pl.html> Acesso em: 20 jan. 2022.

¹¹⁶ CANALSOLAR. **Lei 14.300**: principais mudanças do Marco Legal da GD. Disponível em: <https://canalsolar.com.br/lei-14-300-principais-mudancas-do-marco-legal-da-gd/> Acesso em: 20 jan. 2022.

¹¹⁷ Ouvido, o Ministério da Economia manifestou-se pelo veto ao seguinte dispositivo do Projeto de Lei: Parágrafo único do art. 28. “Parágrafo único. Para fins desta Lei, os projetos de minigeração distribuída serão considerados projetos de infraestrutura de geração de energia elétrica, para o enquadramento no § 1º do art. 1º da Lei n. 11.478, de 29 de maio de 2007, e no art. 2º da Lei n. 11.488, de 15 de junho de 2007, e no art. 2º da Lei n. 12.431, de 24 de junho de 2011, observado que, nesse último caso, serão considerados projetos prioritários e que proporcionam benefícios ambientais e sociais relevantes”; Razões do veto: “A proposição legislativa estabelece que os projetos de minigeração distribuída seriam considerados projetos de infraestrutura de geração de energia elétrica para fins de enquadramento no disposto no § 1º do art. 1º da Lei n. 11.478, de 29 de maio de 2007, e no

sobre essa situação Pedro Dante explica que: “Temos um problema, os projetos não vão ser financiados? Não, o mercado evoluiu muito. Os projetos de geração distribuída estão seguros do ponto de vista de estruturação dos contratos. Existe uma atratividade, rentabilidade dos mesmos”, e que no entendimento dele não haveria motivo para incentivos adicionais a esses empreendimentos.¹¹⁸

A Lei n. 14.300/2022 é uma lei federal que trata sobre o Marco Legal da GD, dos componentes tarifários, do período de transição, do direito adquirido e sobre como esses componentes terão que ser valorados pela Aneel (Agência Nacional de Energia Elétrica). Assim, segundo Pedro Dante, a lei “não trata, especificamente, de questões tributárias, principalmente ICMS (Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços), que é o imposto de competência estadual. É essencial ter isso em mente para que, justamente, não surjam dúvidas e questionamentos que não sejam aplicados na prática”.¹¹⁹

As principais modificações e inovações trazidas pelo Marco Legal da GD, em comparação com as normativas da Aneel que regulavam anteriormente o assunto, estão sintetizadas no quadro abaixo, obtido junto ao CanalSolar.¹²⁰

art. 2º da Lei n. 11.488, de 15 de junho de 2007, que institui o Regime Especial de Incentivos para o Desenvolvimento da Infraestrutura - REIDI, e no art. 2º da Lei n. 12.431, de 24 de junho de 2011, observado que, neste último caso, seriam considerados projetos prioritários que proporcionariam benefícios ambientais e sociais relevantes. Entretanto, apesar da boa intenção do legislador, a proposição legislativa contraria o interesse público, tendo em vista que estenderia aos consumidores, com equipamento de minigeração distribuída, benefícios fiscais que foram desenhados para projetos de infraestrutura que tendem a proporcionar aumento de produtividade da economia significativamente maiores do que aqueles proporcionados pelos minigeradores de energia. Ao considerar que os recursos são escassos em qualquer sistema econômico, essa ampliação de benefícios fiscais diminuiria o incentivo ao desenvolvimento de projetos de infraestrutura importantes para a competitividade nacional. Além disso, o referido dispositivo instituiria renúncia fiscal não prevista anteriormente. Portanto, nos termos do disposto no art. 14 da Lei Complementar n. 101, de 4 de maio de 2000 - Lei de Responsabilidade Fiscal, seria necessária a elaboração de prévia estimativa de impacto orçamentário-financeiro na arrecadação pública e a indicação de medidas para reequilibrar o orçamento público federal, visto tratar-se de medida que geraria renúncia fiscal. Além disso, a medida também contraria o art. 137 da Lei n. 14.116, de 31 de dezembro de 2020 - Lei de Diretrizes Orçamentárias 2021, que dispõe que proposições legislativas que concedam, renovem ou ampliem benefícios tributários deverão conter cláusula de vigência de no máximo cinco anos. A proposição também apresenta inconstitucionalidade, visto que, se trataria de concessão de benefícios fiscais e geraria renúncia de receita, deveria estar acompanhada de demonstrativo de impacto orçamentário-financeiro, nos termos do disposto no art. 113 do Ato das Disposições Constitucionais Transitórias”. In: BRASIL. CÂMARA DOS DEPUTADOS. **Lei n. 14.300, de 6 de janeiro de 2022: Marco Legal da Microgeração e Minigeração Distribuída.** Disponível em: <https://www2.camara.leg.br/legin/fed/lei/2022/lei-14300-6-janeiro-2022-792217-norma-pl.html> Acesso em: 20 jan. 2022.

¹¹⁸ CANALSOLAR. **Lei 14.300: principais mudanças do Marco Legal da GD.** Disponível em: <https://canalsolar.com.br/lei-14-300-principais-mudancas-do-marco-legal-da-gd/> Acesso em: 20 jan. 2022.

¹¹⁹ CANALSOLAR. **Lei 14.300: principais mudanças do Marco Legal da GD.** Disponível em: <https://canalsolar.com.br/lei-14-300-principais-mudancas-do-marco-legal-da-gd/> Acesso em: 20 jan. 2022.

¹²⁰ CANALSOLAR. **Lei 14.300: principais mudanças do Marco Legal da GD.** Disponível em: <https://canalsolar.com.br/lei-14-300-principais-mudancas-do-marco-legal-da-gd/> Acesso em: 20 jan. 2022.

Quadro 1 - Lei n. 14.300/2022: principais mudanças do Marco Legal da GD.

Tema	Como era a REN 482/2012	Lei 14.300/2022
Direito adquirido	Não existia garantia – competência da ANEEL para alterar a Resolução 482/12	Para projetos protocolados até 12 meses após a publicação da Lei fica mantido o regime atual até 31/12/2045
Valoração dos Créditos	Compensação de 100% das componentes tarifárias	Algumas componentes deixarão de ser compensadas de forma gradual e escalonada de acordo com a regra de transição prevista (6 anos – utilização da CDE). A partir de 2029 novo entrada com "regra nova"
Compensação das componentes tarifárias	A REN 482 poderia ser alterada a qualquer momento pela ANEEL – cenário "Alternativa 5" (compensação apenas TE – Energia)	Encontro de "contas" a ser feito em até 18 meses da publicação da Lei, a partir de diretrizes do CNPE (6 meses). A ANEEL será obrigada a considerar o cálculo do SCEE de todos os benefícios ao sistema da GD
Demanda das Usinas	TUSD C	TUSD G (até 70% menor que a TUSD C)
Custo de Disponibilidade	Cobrado em duplicidade na prática	Deixará de ser cobrado em duplicidade
Geração Compartilhada	Via Consórcio (PJ) ou Cooperativa (PF)	Flexibilização. Via Consórcio, Cooperativa, Associação e Condomínio civil (voluntário ou edilício)
Potência Máxima	Em regra até 5 MW para todas as fontes de energia	Até 3 MW para solar (não despacháveis) e até 5 MW para as demais fontes (despacháveis)
Titularidade	Unificar titularidade era uma prática de mercado sem respaldo legal/regulatório	Previsão legal expressa para unificação (pode ser solução para ICMS na geração compartilhada)
Distribuição de Créditos	Prazo de 60 dias para análise da Distribuidora	Prazo caiu para 30 dias
Troca de Titularidade	A qualquer momento, a partir da assinatura do CUSD e do CCER	(i) a transferência de titularidade dos projetos já conectados não implicará na perda dos benefícios já obtidos anteriormente; (ii) será permitida a transferência de titularidade ou transferência de controle, até a solicitação de vistoria do ponto de conexão para a distribuidora
Garantia de fiel cumprimento (caução)	Não há necessidade	2,5% do investimento potência entre 500kW e 1.000 kW e 5% para sistemas maiores que 1.000 kW. Projetos superiores a 500kW devem apresentar garantia em até 90 dias da publicação da lei. Não se aplica à geração compartilhada, EMUC e para os casos em que o CUSD seja firmado em 90 dias da lei
B (optante)	Entendimento atual é de que consumidor não poderia ser B optante com usina minigeração	Permitido B optante com usina junto à carga até 112,5 kW
Prazo para cadastro/porcentagem	60 dias a partir do envio dos dados	30 dias a partir do envio dos dados
Programa para GD em baixa renda	Não existia vedação, mas a ANEEL não recomendava a prática	Fica vedada expressamente comercialização de pareceres de acesso
Comercialização de Energia	Vedado	Possibilidade de comercialização dos excedentes com as distribuidoras por meio de chamada pública a ser regulamentada pela ANEEL
Atributos Ambientais	Atualmente não são valorados	Serão valorados e remunerados a partir de março de 2022
Prazo para cumprimento das disposições	Sem previsão	Distribuidoras deverão se adequar e operacionalizar as alterações em até 180 (cento e oitenta) dias da data de publicação desta Lei

Fonte: CANALSOLAR.¹²¹

Considerando a hierarquia das normas no ordenamento jurídico brasileiro, uma lei federal é (muito) superior às normativas da Aneel existentes, e dessa forma, revoga tacitamente todos os dispositivos dessas normativas que forem conflitantes com as disposições da nova legislação do Marco Legal da GD. Assim, várias foram as modificações e inovações trazidas pelo Marco Legal da GD, em comparação com as normativas da Aneel então existentes, sendo as principais a Resolução Normativa n. 482/2012 e a Resolução Normativa n. 687/2015, apresentadas na tabela acima e percorridas a seguir.

¹²¹ CANALSOLAR. **Lei 14.300**: principais mudanças do Marco Legal da GD. Disponível em: <https://canalsolar.com.br/lei-14-300-principais-mudancas-do-marco-legal-da-gd/> Acesso em: 20 jan. 2022.

3.2.1 Direito adquirido

Antes da Lei Federal n. 14.300/2022, os direitos compensatórios dos créditos da geração distribuída eram regulados pela Resolução Normativa n. 482/2012 (REN 482) e seguintes da Aneel, que por se tratar de normativa de ordem administrativa, vinculava as concessionárias e permissionárias dos serviços públicos de energia a cumprirem essas normativas. Contudo, os direitos criados por essas normativas eram apenas de ordem administrativa, e poderiam ser modificados ao critério da agência reguladora – a Aneel – conforme sua conveniência, aumentando o risco dos investidores e conseqüentemente trazendo reflexos negativos na valoração de mercado da infraestrutura de geração e no seu valor como garantia na obtenção de recursos financeiros adicionais.

Na medida em que o crédito de energia a ser compensado possui um valor econômico proporcional ao valor da energia, a existência do risco de uma modificação na regulação (modificar o valor desses créditos), como por exemplo, reduzindo o tempo da compensação para 48 meses, traz insegurança aos investidores e nos agentes econômicos que financiarão essa infraestrutura, que calculam e repassam esse risco para as taxas dos financiamentos e aumentam a exigência de garantias.

Com o advento do Marco Legal da GD, esses riscos são muito reduzidos, na medida em que a nova legislação traz garantias de manutenção das regras atuais de compensação até 31 de dezembro de 2045 para unidades beneficiárias da energia oriunda de microgeradores e minigeradores, aos projetos protocolados até 12 meses da publicação da lei, trazendo previsibilidade aos investidores e financiadores dessa infraestrutura de geração de energia.

A garantia trazida pela lei gera efeitos de segurança jurídica muito mais amplos do que as regulações anteriores, reduzindo os riscos e por consequência os custos ao se investir nessa tecnologia. Anteriormente, uma eventual mudança regulatória poderia trazer prejuízos significativos aos investidores, e mudanças regulatórias são mais fáceis de realizar do que modificações em Leis Federais, as quais têm um processo legislativo conhecido e pensado para se evitar situações de insegurança jurídica.

Assim, além das garantias de compensação dos créditos de energia até 31 de dezembro de 2045 aos projetos protocolados em até 12 meses da data de publicação da Lei Federal n. 14.300/2022, a própria existência dessa lei traz segurança, ao modificar o patamar jurídico da Geração Distribuída, deixando de ser apenas uma norma regulatória, para uma Lei Federal, com todas as implicações decorrentes.

3.2.2 Valoração dos créditos compensatórios

Pela regulação até então existente, a compensação dos créditos era realizada na integralidade, e como já explicado, os projetos protocolados em até 12 meses da data de publicação da Lei Federal n. 14.300/2022 terão garantidos a integralidade dessa compensação até 31 de dezembro de 2045.

A partir de meados de janeiro de 2023, quando a Lei Federal n. 14.300/2022 completar um ano, todos os projetos desenvolvidos irão deixar de ter essa compensação integral, e passarão a ter uma compensação parcial, pois esses novos projetos passarão a remunerar os componentes tarifários, estando aí incluído o chamado ‘fio B’ para a distribuidora de energia, e conforme o porte dos mesmos também pagarão parte do ‘fio A’, que remunera as transmissoras de energia, os projetos de pesquisa e desenvolvimento e as tarifas de fiscalização do setor elétrico.

Os componentes da Tarifa de Uso dos Sistemas de Distribuição (TUSD) de Energia Elétrica são compostos por valores relativos ao: a) Serviço de transmissão de energia elétrica, na forma da TUSD – Fio A; b) Serviço de distribuição de energia elétrica, na forma da TUSD – Fio B; c) Encargos do próprio sistema de distribuição, na forma da TUSD – Encargos do Serviço de Distribuição; d) Perdas elétricas técnicas e não técnicas, respectivamente, na forma TUSD – Perdas Técnicas e TUSD – Perdas Não Técnicas; e) Conta de Consumo de Combustíveis – CCC, na forma TUSD – CCC S/SE/CO, TUSD – CCC N/NE e TUSD – CCC Isolados, conforme o caso; f) Conta de Desenvolvimento Energético – CDE, nas formas TUSD – CDE S/SE/CO e TUSD – CDE N/NE, conforme o caso; e g) Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica – PROINFA.¹²²

Os novos projetos protocolados após os 12 meses da Lei n. 14.300/2022 passarão a ter redução na compensação dos tributos de maneira escalonada, gradativa ao longo do tempo, com base na data de publicação da Lei n. 14.300/2022, iniciando em quinze por cento em 2023 até a noventa por cento em 2028,¹²³ e a partir de 2029 ficarão sujeitas às regras tarifárias

¹²² ANEEL. AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Componentes da Tarifa de Uso dos Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica – TUSD**. Disponível em: <https://bit.ly/3rCys7z> Acesso em: 22 jan. 2022.

¹²³ BRASIL. CÂMARA DOS DEPUTADOS. **Lei n. 14.300, de 6 de janeiro de 2022**: Marco Legal da Microgeração e Minigeração Distribuída. Disponível em: <https://www2.camara.leg.br/legin/fed/lei/2022/lei-14300-6-janeiro-2022-792217-norma-pl.html> Acesso em: 20 jan. 2022.

Art. 27: O faturamento de energia das unidades participantes do SCEE não abrangidas pelo art. 26 desta Lei deve considerar a incidência sobre toda a energia elétrica ativa compensada dos seguintes percentuais das componentes tarifárias relativas à remuneração dos ativos do serviço de distribuição, à quota de reintegração

estabelecidas pela Aneel para as unidades consumidoras com microgeração ou minigeração distribuída.¹²⁴

A questão da compensação das componentes tarifárias vinha sendo um ponto de divergência entre os defensores da geração distribuída, especialmente por esta usar principalmente energia renovável, e os agentes do setor elétrico, em especial os grupos de interesses das distribuidoras. Enquanto aqueles argumentavam da importância ambiental da energia renovável, estes argumentavam que havia custos envolvidos e a compensação integral existente onerava os demais consumidores.

A Lei Federal n. 14.300/2022 buscou equacionar a solução desses interesses, de forma a permitir uma transição gradual entre a compensação integral então existente, até ao repasse aos prosumidores desses custos das componentes tarifárias, mantendo assim os estímulos a esse importante mercado de geração de energia sustentável e gradualmente reduzindo os eventuais subsídios cruzados existentes.

Segundo Bárbara Rubim,¹²⁵ a estimativa é que após a finalização dos prazos escalonados dos benefícios na compensação, os prosumidores enquadrados no autoconsumo remoto de até 500kW, terão que pagar em média 27% (vinte e sete por cento) do valor da tarifa, em remuneração para a distribuidora de energia.

regulatória (depreciação) dos ativos de distribuição e ao custo de operação e manutenção do serviço de distribuição: I - 15% (quinze por cento) a partir de 2023; II - 30% (trinta por cento) a partir de 2024; III - 45% (quarenta e cinco por cento) a partir de 2025; IV - 60% (sessenta por cento) a partir de 2026; V - 75% (setenta e cinco por cento) a partir de 2027; VI - 90% (noventa por cento) a partir de 2028; VII - a regra disposta no art. 17 desta Lei a partir de 2029.

¹²⁴ BRASIL. CÂMARA DOS DEPUTADOS. **Lei n. 14.300, de 6 de janeiro de 2022**: Marco Legal da Microgeração e Minigeração Distribuída. Disponível em: <https://www2.camara.leg.br/legin/fed/lei/2022/lei-14300-6-janeiro-2022-792217-norma-pl.html> Acesso em: 20 jan. 2022.

Art. 17: Após o período de transição de que tratam os arts. 26 e 27 desta Lei, as unidades participantes do SCEE ficarão sujeitas às regras tarifárias estabelecidas pela Aneel para as unidades consumidoras com microgeração ou minigeração distribuída. § 1º As unidades consumidoras de que trata o caput deste artigo serão faturadas pela incidência, sobre a energia elétrica ativa consumida da rede de distribuição e sobre o uso ou sobre a demanda, de todas as componentes tarifárias não associadas ao custo da energia, conforme regulação da Aneel, e deverão ser abatidos todos os benefícios ao sistema elétrico propiciados pelas centrais de microgeração e minigeração distribuída. § 2º Competirá ao Conselho Nacional de Política Energética (CNPE), ouvidos a sociedade, as associações e entidades representativas, as empresas e os agentes do setor elétrico, estabelecer as diretrizes para valoração dos custos e dos benefícios da microgeração e minigeração distribuída, observados os seguintes prazos, contados da data de publicação desta Lei: I - até 6 (seis) meses para o CNPE estabelecer as diretrizes; e II - até 18 (dezoito) meses para a Aneel estabelecer os cálculos da valoração dos benefícios. § 3º No estabelecimento das diretrizes de que trata o § 2º deste artigo, o CNPE deverá considerar todos os benefícios, incluídos os locais da microgeração e minigeração distribuída ao sistema elétrico compreendendo as componentes de geração, perdas elétricas, transmissão e distribuição. § 4º Após o transcurso dos prazos de transição de que trata o caput deste artigo, a unidade consumidora participante ou que venha a participar do SCEE será faturada pela mesma modalidade tarifária vigente estipulada em regulação da Aneel para a sua classe de consumo, observados os princípios desta Lei.

¹²⁵ RUBIM, Bárbara. **Lei 14.300**: valoração dos créditos e como ficou o custo de disponibilidade (Parte 02). Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=dOW8EZUzD4c> Acesso em: 20 fev. 2022.

3.2.3 Compensação das componentes tarifárias

A regulação existente estava sob intenso debate no tocante à compensação das componentes tarifárias, como já mencionado, e nesse sentido a Aneel realizou um estudo de impacto regulatório sobre essa temática,¹²⁶ publicado em dezembro de 2018, onde comparava a situação existente pela REN 482 (que denominou ‘alternativa 0’) com outras cinco propostas de compensação (que denominou de ‘alternativa’ 1 a 5).

Esse estudo avaliou que se “fosse mantida a Alternativa 0 após a revisão da norma (a partir de 2020), haveria um prejuízo para os demais consumidores da ordem de 4,7 bilhões de reais, no período de análise considerado (entre 2020 e 2035). No entanto, se fosse alterado o Sistema de Compensação para qualquer uma das demais alternativas, haveria um ganho líquido positivo entre 8 e 10 bilhões de reais”.¹²⁷

Contudo, a Aneel levou em consideração a premissa que o mercado de geração distribuída (GD) está em processo de consolidação, e que uma modificação em etapas seria recomendada, de modo que a GD se desenvolva e gradualmente essa situação da compensação fosse equalizada para evitar prejuízos aos demais consumidores, pois não seria sustentável manter indefinidamente o modelo de compensação então vigente.¹²⁸

Assim, a REN 482 estava na iminência de ser modificada pela Aneel, e com o advento da Lei Federal n. 14.300/2022, Marco Legal da GD, a discussão dessa temática tão importante para o futuro do setor elétrico, foi para a Congresso Nacional, que trouxe segurança jurídica e legitimidade à solução escolhida para a compensação das componentes tarifárias, criando o Sistema de Compensação de Energia Elétrica (SCEE) e o Programa de Energia Renovável Social (PERS).

¹²⁶ ANEEL. AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Revisão das regras aplicáveis à micro e minigeração distribuída**. Relatório de Análise de Impacto Regulatório n. 0004/2018-SRD/SCG/SMA/Aneel. Brasília, 06/12/2018. Versão nº 1, Pré-Participação Pública. Disponível em: <https://static.poder360.com.br/2020/01/aneel-proposta.pdf> Acesso em: 03 out. 2020.

¹²⁷ ANEEL. AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Revisão das regras aplicáveis à micro e minigeração distribuída**. Relatório de Análise de Impacto Regulatório n. 0004/2018-SRD/SCG/SMA/Aneel. Brasília, 06/12/2018. Versão nº 1, Pré-Participação Pública. Disponível em: <https://static.poder360.com.br/2020/01/aneel-proposta.pdf> Acesso em: 03 out. 2020 [p. 33].

¹²⁸ ANEEL. AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Revisão das regras aplicáveis à micro e minigeração distribuída**. Relatório de Análise de Impacto Regulatório n. 0004/2018-SRD/SCG/SMA/Aneel. Brasília, 06/12/2018. Versão nº 1, Pré-Participação Pública. Disponível em: <https://static.poder360.com.br/2020/01/aneel-proposta.pdf> Acesso em: 03 out. 2020 [p. 33-34].

A solução escolhida está disposta no art. 17 da Lei n. 14.300/2022,¹²⁹ que dá competência ao Conselho Nacional de Política Energética (CNPE), ouvidos a sociedade, as associações e entidades representativas, as empresas e os agentes do setor elétrico, para estabelecer as diretrizes para valoração dos custos e dos benefícios da microgeração e minigeração distribuída. Os prazos são de até seis meses para a definição das diretrizes e de até dezoito meses para estabelecer os cálculos da valoração dos benefícios.

Muito interessante observar que no § 3º desse artigo, determinou-se que o CNPE deverá considerar todos os benefícios, incluídos os locacionais da microgeração e minigeração distribuída ao sistema elétrico, compreendendo as componentes de geração, perdas elétricas, transmissão e distribuição. Pois se por um lado a GD traz custos, por outro lado ela também traz benefícios e economias que deverão ser contabilizados nos cálculos valorativos.

3.2.4 Demanda das usinas

As usinas de minigeração remotas deixarão de pagar demanda contratada como se fossem unidades consumidoras e passarão a pagar pelo uso da rede pelo que realmente são: unidades geradoras de energia. Essa alteração traz a mudança da tributação da TUSD C para a TUSD G e é bastante benéfica, pois o pagamento pelo uso da rede por geradores é consideravelmente inferior em relação ao feito por consumidores. Para completar, a lei

¹²⁹ BRASIL. CÂMARA DOS DEPUTADOS. **Lei n. 14.300, de 6 de janeiro de 2022**: Marco Legal da Microgeração e Minigeração Distribuída. Disponível em: <https://www2.camara.leg.br/legin/fed/lei/2022/lei-14300-6-janeiro-2022-792217-norma-pl.html> Acesso em: 20 jan. 2022.

Art. 17: Após o período de transição de que tratam os arts. 26 e 27 desta Lei, as unidades participantes do SCEE ficarão sujeitas às regras tarifárias estabelecidas pela Aneel para as unidades consumidoras com microgeração ou minigeração distribuída. § 1º As unidades consumidoras de que trata o caput deste artigo serão faturadas pela incidência, sobre a energia elétrica ativa consumida da rede de distribuição e sobre o uso ou sobre a demanda, de todas as componentes tarifárias não associadas ao custo da energia, conforme regulação da Aneel, e deverão ser abatidos todos os benefícios ao sistema elétrico propiciados pelas centrais de microgeração e minigeração distribuída. § 2º Competirá ao Conselho Nacional de Política Energética (CNPE), ouvidos a sociedade, as associações e entidades representativas, as empresas e os agentes do setor elétrico, estabelecer as diretrizes para valoração dos custos e dos benefícios da microgeração e minigeração distribuída, observados os seguintes prazos, contados da data de publicação desta Lei: I - até 6 (seis) meses para o CNPE estabelecer as diretrizes; e II - até 18 (dezoito) meses para a Aneel estabelecer os cálculos da valoração dos benefícios. § 3º No estabelecimento das diretrizes de que trata o § 2º deste artigo, o CNPE deverá considerar todos os benefícios, incluídos os locacionais da microgeração e minigeração distribuída ao sistema elétrico compreendendo as componentes de geração, perdas elétricas, transmissão e distribuição. § 4º Após o transcurso dos prazos de transição de que trata o caput deste artigo, a unidade consumidora participante ou que venha a participar do SCEE será faturada pela mesma modalidade tarifária vigente estipulada em regulação da Aneel para a sua classe de consumo, observados os princípios desta Lei.

também traz melhoria para a questão do custo de disponibilidade, eliminando a cobrança em duplicidade hoje existente.¹³⁰

3.2.5 Custo de disponibilidade

O Custo de Disponibilidade é aquela taxa mínima que as usinas e os consumidores que são atendidos em baixa tensão pagam para garantir que se eles não consumirem o mínimo necessário para remunerar a existência e a disponibilidade da rede de distribuição, ainda assim eles haverão de pagar essa taxa para custear os custos de manutenção da infraestrutura utilizada.

O custo de disponibilidade estava regulado através da Resolução n. 414/2010 da Aneel,¹³¹ a qual foi revogada pela Resolução n. 1000/2021,¹³² que a substituiu, e que em seu art. 291 determina valores distintos dessa taxa mínima, conforme o padrão de conexão que consta a seguir: I - 30 kWh, se monofásico ou bifásico a 2 (dois) condutores; II - 50 kWh, se bifásico a 3 (três) condutores; ou III - 100 kWh, se trifásico.

Até então, pela REN 482/2012, quando o prosumidor gerava sua própria energia e utilizava a GD para injetar essa energia na rede, ele estava pagando esse custo de disponibilidade duas vezes. Isso acontecia porque primeiramente os créditos de energia que ele possuía eram descontados, e depois se acrescia os valores da energia excedente consumida. Assim, caso o prosumidor possuísse créditos de energia suficientes para descontar a integralidade da energia consumida, resultando em zero ou valor inferior a quantidade mínima de energia prevista para o padrão da ligação, posteriormente seria acrescido o valor do custo de disponibilidade, resultando assim em pagamento em duplicidade dessa energia.

Para exemplificar, imagine um prosumidor da classe III, com custo de disponibilidade previsto em 100kW. Em um mês que ele consumisse 300kW, e possuísse 300kW ou mais em créditos a compensar, primeiramente se descontariam integralmente os créditos, resultando em zero, e após essa etapa, como o consumo estaria em zero, se acrescentaria a quantidade de 100kW referente ao custo de disponibilidade.

¹³⁰ TAB ENERGIA. **PL 5829/Lei 14.300**: o impacto do marco legal da energia solar. Disponível em: <https://tabenergia.com.br/blog/pl-5829-lei-14-300-o-impacto-do-marco-legal-da-energia-solar/> Acesso em: 02 fev. 2022.

¹³¹ ANEEL. AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução Normativa n. 414, de 9 de setembro de 2010**. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2010414.pdf> Acesso em: 10 mar. 2022.

¹³² ANEEL. AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução Normativa n. 1.000, de 7 de dezembro de 2021**. Disponível em: <https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren20211000.pdf> Acesso em: 12 fev. 2022.

A Lei Federal n. 14.300/2022 modifica essa situação, conforme disposto em seu art. 16,¹³³ evitando que ocorram essas duplicidades de pagamento, tanto para aqueles prosumidores existentes e eminentes, que estão no chamado ‘direito adquirido’, tanto para aqueles que ingressarem após os doze meses previstos.

Com a Lei Federal n. 14.300/2022, os prosumidores já existentes e aqueles que protocolarem o pedido de GD nos próximos doze meses, que estão no direito adquirido, terão do custo de disponibilidade descontado primeiramente do consumo de energia, e o consumo restante será descontado dos créditos de energia da GD. Assim, continua o pagamento da taxa mínima ou custo de disponibilidade, mas não serão descontados créditos de GD referentes ao custo de disponibilidade, que ficam para serem descontados posteriormente.

Às unidades que protocolarem o pedido de GD após os doze meses previstos para a manutenção do direito adquirido, haverá a aplicação da nova regra geral, onde os créditos de energia da GD são abatidos do consumo mensal, e caso haja a integralidade da compensação, não haverá a cobrança do custo de disponibilidade. Isto porque para esse novo enquadramento, haverá a cobrança do chamado ‘Fio B’, que remunera as distribuidoras pela manutenção e disponibilidade da rede, proporcionalmente ao valor da tarifa de energia, que será o novo modelo remuneratório do atual custo de disponibilidade.

3.2.6 Geração compartilhada

Pela Resolução Normativa n. 482/2012, posteriormente modificada pela Resolução Normativa n. 687/2015, o seu art. 2 traz várias definições, e no inciso VII, conceituava a geração compartilhada,¹³⁴ cuja redação levou a um entendimento de que a geração

¹³³ BRASIL. CÂMARA DOS DEPUTADOS. **Lei n. 14.300, de 6 de janeiro de 2022**: Marco Legal da Microgeração e Minigeração Distribuída. Disponível em: <https://www2.camara.leg.br/legin/fed/lei/2022/lei-14300-6-janeiro-2022-792217-norma-pl.html> Acesso em: 20 jan. 2022.

Art. 16: Para fins de compensação, a energia injetada, o excedente de energia ou o crédito de energia devem ser utilizados até o limite em que o valor em moeda relativo ao faturamento da unidade consumidora seja maior ou igual ao valor mínimo faturável da energia estabelecido na regulamentação vigente. § 1º Para as unidades consumidoras participantes do SCEE não enquadradas no caput do art. 26 desta Lei, o valor mínimo faturável da energia deve ser aplicado se o consumo medido na unidade consumidora, desconsideradas as compensações oriundas do SCEE, for inferior ao consumo mínimo faturável estabelecido na regulamentação vigente. § 2º O valor mínimo faturável aplicável aos microgeradores com compensação no mesmo local da geração e cujo gerador tenha potência instalada de até 1.200 W (mil e duzentos watts) deve ter uma redução de até 50% (cinquenta por cento) em relação ao valor mínimo faturável aplicável aos demais consumidores equivalentes, conforme regulação da Aneel.

¹³⁴ ANEEL. AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução Normativa n. 482, de 17 de abril de 2012**. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf> Acesso em: 08 mar. 2022.

Art. 2º: Para efeitos desta Resolução, ficam adotadas as seguintes definições: [...] VII – geração compartilhada: caracterizada pela reunião de consumidores, dentro da mesma área de

compartilhada poderia se dar através de consórcios, no caso de pessoas jurídicas, ou por cooperativas, se composta por pessoas físicas. A redação da normativa não trazia essa exigência, e talvez se consolidou um entendimento equivocado, que agora com o Marco Legal da GD está sendo superado.

Da mesma forma, a Lei Federal n. 14.300/2022 em seu art. 1º traz várias definições, e no inciso III define o consórcio de consumidores de energia elétrica, e no inciso X define a geração compartilhada.¹³⁵ Nesse sentido, as definições trazidas pela lei, são mais amplas que as anteriores, viabilizando que os consumidores possam se reunir, compartilhando recursos para a geração distribuída, seja “por meio de consórcio, cooperativa, condomínio civil voluntário ou edifício ou qualquer outra forma de associação civil, instituída para esse fim, composta por pessoas físicas ou jurídicas que possuam unidade consumidora com microgeração ou minigeração distribuída, com atendimento de todas as unidades consumidoras pela mesma distribuidora”.

Assim, pela Lei Federal n. 14.300/2022 restou claro a possibilidade da utilização dos consórcios para a geração compartilhada, seja para pessoas físicas ou jurídicas consumidoras de energia, com objetivo de gerar créditos para abater de seu próprio consumo, dentro da mesma distribuidora de energia.

A ampliação das possibilidades constitutivas para a geração compartilhada simplifica e contribui para a utilização dessa modalidade de GD, que pode trazer muitos consumidores para esse mercado, especialmente aqueles residentes em edifícios que não possuem área de telhado para a instalação da infraestrutura de GD na própria unidade consumidora.

concessão ou permissão, por meio de consórcio ou cooperativa, composta por pessoa física ou jurídica, que possua unidade consumidora com microgeração ou minigeração distribuída em local diferente das unidades consumidoras nas quais a energia excedente será compensada; (Incluído pela REN ANEEL 687, de 24.11.2015).

¹³⁵ BRASIL. CÂMARA DOS DEPUTADOS. **Lei n. 14.300, de 6 de janeiro de 2022**: Marco Legal da Microgeração e Minigeração Distribuída. Disponível em: <https://www2.camara.leg.br/legin/fed/lei/2022/lei-14300-6-janeiro-2022-792217-norma-pl.html> Acesso em: 20 jan. 2022.

Art. 1º: Para fins e efeitos desta Lei, são adotadas as seguintes definições: [...] III – consórcio de consumidores de energia elétrica: reunião de pessoas físicas e/ou jurídicas consumidoras de energia elétrica instituído para a geração de energia destinada a consumo próprio, com atendimento de todas as unidades consumidoras pela mesma distribuidora; [...] X - geração compartilhada: modalidade caracterizada pela reunião de consumidores, por meio de consórcio, cooperativa, condomínio civil voluntário ou edifício ou qualquer outra forma de associação civil, instituída para esse fim, composta por pessoas físicas ou jurídicas que possuam unidade consumidora com microgeração ou minigeração distribuída, com atendimento de todas as unidades consumidoras pela mesma distribuidora.

3.2.7 Potência máxima

A REN 482/2012 com a nova redação dada pela REN 687/2015, definiu um limite de 75kW para a microgeração distribuída, e acima desse valor até um limite de 5MW denominou como minigeração distribuída.¹³⁶

Já a Lei Federal n. 14.300/2022 no seu art. 1º, XI e XIII, trouxe a definição atualizada da microgeração distribuída, que continua limitada em 75kW, e da minigeração distribuída, sendo que a principal diferença é que nesta modalidade, manteve-se a potência de 5MW para as fontes despacháveis e 3MW para as fontes não despacháveis.¹³⁷

No mesmo artigo referido, no item IX, vem a definição de fontes despacháveis, sendo: “as hidrelétricas, incluídas aquelas a fio d'água que possuam viabilidade de controle variável de sua geração de energia, cogeração qualificada, biomassa, biogás e fontes de geração fotovoltaica, limitadas, nesse caso, a 3 MW (três megawatts) de potência instalada, com

¹³⁶ ANEEL. AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução Normativa n. 482, de 17 de abril de 2012**. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf> Acesso em: 08 mar. 2022.

Art. 2º: Para efeitos desta Resolução, ficam adotadas as seguintes definições: [...] I - microgeração distribuída: central geradora de energia elétrica, com potência instalada menor ou igual a 75 kW e que utilize cogeração qualificada, conforme regulamentação da ANEEL, ou fontes renováveis de energia elétrica, conectada na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras; (Redação dada pela REN ANEEL 687, de 24.11.2015). II - minigeração distribuída: central geradora de energia elétrica, com potência instalada superior a 75 kW e menor ou igual a 5MW e que utilize cogeração qualificada, conforme regulamentação da ANEEL, ou fontes renováveis de energia elétrica, conectada na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras; (Redação dada pela REN ANEEL 786, de 17.10.2017).

¹³⁷ BRASIL. CÂMARA DOS DEPUTADOS. **Lei n. 14.300, de 6 de janeiro de 2022:** Marco Legal da Microgeração e Minigeração Distribuída. Disponível em: <https://www2.camara.leg.br/legin/fed/lei/2022/lei-14300-6-janeiro-2022-792217-norma-pl.html> Acesso em: 20 jan. 2022.

Art. 1º: Para fins e efeitos desta Lei, são adotadas as seguintes definições: [...] IX - fontes despacháveis: as hidrelétricas, incluídas aquelas a fio d'água que possuam viabilidade de controle variável de sua geração de energia, cogeração qualificada, biomassa, biogás e fontes de geração fotovoltaica, limitadas, nesse caso, a 3 MW (três megawatts) de potência instalada, com baterias cujos montantes de energia despachada aos consumidores finais apresentam capacidade de modulação de geração por meio do armazenamento de energia em baterias, em quantidade de, pelo menos, 20% (vinte por cento) da capacidade de geração mensal da central geradora que podem ser despachados por meio de um controlador local ou remoto; [...] XI - microgeração distribuída: central geradora de energia elétrica, com potência instalada, em corrente alternada, menor ou igual a 75 kW (setenta e cinco quilowatts) e que utilize cogeração qualificada, conforme regulamentação da Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel), ou fontes renováveis de energia elétrica, conectada na rede de distribuição de energia elétrica por meio de instalações de unidades consumidoras; XII – microrrede: integração de vários recursos de geração distribuída, armazenamento de energia elétrica e cargas em sistema de distribuição secundário capaz de operar conectado a uma rede principal de distribuição de energia elétrica e também de forma isolada, controlando os parâmetros de eletricidade e provendo condições para ações de recomposição e de autorrestabelecimento; XIII - minigeração distribuída: central geradora de energia elétrica renovável ou de cogeração qualificada que não se classifica como microgeração distribuída e que possua potência instalada, em corrente alternada, maior que 75 kW (setenta e cinco quilowatts), menor ou igual a 5 MW (cinco megawatts) para as fontes despacháveis e menor ou igual a 3 MW (três megawatts) para as fontes não despacháveis, conforme regulamentação da Aneel, conectada na rede de distribuição de energia elétrica por meio de instalações de unidades consumidoras; [...] Parágrafo único. Para todas as unidades referidas no caput do art. 26 desta Lei, o limite de potência instalada de que trata o inciso XIII do caput deste artigo é de 5 MW (cinco megawatts) até 31 de dezembro de 2045.

baterias cujos montantes de energia despachada aos consumidores finais apresentam capacidade de modulação de geração por meio do armazenamento de energia em baterias, em quantidade de, pelo menos, 20% (vinte por cento) da capacidade de geração mensal da central geradora que podem ser despachados por meio de um controlador local ou remoto”.

As fontes despacháveis seriam basicamente aquelas que permitem um controle mais preciso do momento da geração da energia, em razão da possibilidade de armazenamento da fonte de geração. Assim, elas não ficam totalmente sujeitas à intermitência da fonte de geração, como os ventos na energia eólica ou a irradiação solar, no caso de placas fotovoltaicas. Também as hidrelétricas com reservatório de acumulação, as usinas termelétricas em geral e as usinas geotérmicas são consideradas fontes despacháveis.

Assim, para a minigeração distribuída, excluindo-se quem tem o direito adquirido ou quem protocole o projeto para aprovação dentro dos doze meses, reduziu-se para 3MW (três megawatts) de potência para as fontes não despacháveis, e mantiveram-se os 5MW (cinco megawatts) de potência para as fontes despacháveis. A relevância dessa exigência se dá em função da resposta da demanda, e entendeu-se que a minigeração deve contar com infraestrutura para atender aos picos de consumo, onde não basta a quantidade de energia a ser fornecida, mas também condições de manter a estabilidade da potência por razoável período de tempo.

Há uma divergência entre a redação do item IX e do item XIII, pois naquele a geração fotovoltaica despachável fica limitada a 3MW (três megawatts) de potência e exige-se ainda o armazenamento de energia em baterias, em quantidade de, pelo menos, 20% (vinte por cento) da capacidade de geração mensal. Enquanto no item XIII, para até 3MW (três megawatts) não há exigência de a fonte ser despachável, o que não exigiria as baterias para a geração fotovoltaica nessa potência.

Dessa forma, permitiu-se uma capacidade maior de potência para as fontes despacháveis, incentivando que os projetos de minigeração incluam infraestrutura de baterias ou usinas hidrelétricas reversíveis ou de bombeamento, como forma de inserir maior estabilidade no sistema elétrico, reduzindo a intermitência e as oscilações na capacidade de geração de energia.

3.2.8 Titularidade

A REN 482/2012 não tratou da transferência de titularidade dos projetos de GD, já que o objetivo dessa resolução era iniciar a utilização da GD no sistema elétrico brasileiro, e para isso, a ideia inicial seria que os consumidores pudessem compensar seu próprio consumo, reduzindo sua tarifa, valendo-se de investimento em infraestrutura de geração distribuída, bem como também possibilitar as distribuidoras desenvolverem os sistemas de compensação e os recursos energéticos necessários para poder receber essa energia oriunda da GD. Além da regulação direta, outros aspectos legais foram surgindo ou se ajustando para atender as situações decorrentes da GD, tal como os aspectos tributários, como o ICMS da legislação dos Estados, que tem a competência para essa tributação.

Nos quase dez anos passados entre a REN 482/2012 e a Lei Federal n. 14.300/2022, a GD se consolidou como importante forma de geração de energia elétrica, e sua importância em âmbito estratégico e econômico ganhou novas dimensões. Nesse sentido, é natural que a nova legislação traga disposições pensadas para essa nova fase da GD, onde pela relevância econômica dos projetos e investimentos a serem realizados, bem como pelos impactos que ocorrerão para os envolvidos no setor elétrico (tais como as distribuidoras), se faz necessário previsibilidade e equilíbrio entre direitos e deveres, evitando abusos contratuais e insegurança jurídica.

A Lei Federal n. 14.300/2022 começa tratando do assunto da transferência da titularidade, vedando a transferência do titular ou do controle societário do titular, indicado no parecer de acesso, até a solicitação de vistoria do ponto de conexão para a distribuidora. Ou seja, depois que for protocolado o pedido para a GD, não é possível trocar o titular do pedido, sob pena do pedido ser cancelado. Aqui não se trata da transferência da propriedade da unidade microgeração ou minigeração, ou mesmo dos créditos excedentes de energia elétrica existentes, mas sim da proibição da transferência do pedido de ligação, que se houver, a penalidade é o cancelamento do pedido existente.¹³⁸ Após essa etapa, pode-se realizar a

¹³⁸ ANEEL. AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução Normativa n. 482, de 17 de abril de 2012**. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf> Acesso em: 08 mar. 2022.

Art. 5º: Fica vedada a transferência do titular ou do controle societário do titular da unidade com microgeração ou minigeração distribuída indicado no parecer de acesso até a solicitação de vistoria do ponto de conexão para a distribuidora, assegurada a destinação de créditos de energia às unidades consumidoras beneficiárias, a partir do primeiro ciclo de faturamento subsequente ao do pedido. Parágrafo único. A não observância da vedação prevista no caput deste artigo implica o cancelamento do parecer de acesso.

transferência de titularidade e a própria lei assegura a destinação de créditos de energia às unidades consumidoras beneficiárias.

A ideia foi no sentido de evitar um excesso de pedidos de aprovação de projetos de GD, criados apenas para garantir os benefícios do direito adquirido previsto para os projetos protocolados no prazo de doze meses após a publicação do Marco Legal da GD, que caso pudessem ser transferidos a novos titulares, além de congestionar o sistema de aprovação, acabaria garantindo direitos a projetos apresentados sem real titular, mas idealizados por empresas apenas para depois serem revendidos àqueles que viessem posteriormente a adquirir um projeto de GD.

Assim, tal proibição está orientada a permitir que os projetos com real objetivo de execução, com titular definido e com recolhimento da garantia de fiel cumprimento, sejam aprovados com celeridade, bem como evitar que os benefícios do direito adquirido fossem transferidos a projetos fictícios, reduzindo os custos de compensação a serem arrecadados nos projetos a serem apresentados após o período dos doze meses.

3.2.9 Distribuição de créditos

A REN 482/2012 em seu art. 7º, VIII, previa o prazo de sessenta dias para a distribuidora de energia realizar os ajustes solicitados pelo titular da unidade consumidora, dos percentuais de energia excedentes destinados a cada unidade consumidora por ele indicada. Ou seja, após o titular realizar o protocolo da indicação para quais unidades consumidoras ele desejava compensar seus créditos de energia excedente, e qual o percentual desse excedente ele destinava para compensar em cada uma delas, a distribuidora tinha o prazo de sessenta dias para realizar esses ajustes contratuais.¹³⁹

¹³⁹ ANEEL. AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução Normativa n. 482, de 17 de abril de 2012**. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf> Acesso em: 08 mar. 2022.

Art. 7º: No faturamento de unidade consumidora integrante do sistema de compensação de energia elétrica devem ser observados os seguintes procedimentos: (Redação dada pela REN ANEEL 687, de 24.11.2015.) [...] VIII - o titular da unidade consumidora onde se encontra instalada a microgeração ou minigeração distribuída deve definir o percentual da energia excedente que será destinado a cada unidade consumidora participante do sistema de compensação de energia elétrica, podendo solicitar a alteração junto à distribuidora, desde que efetuada por escrito, com antecedência mínima de 60 (sessenta) dias de sua aplicação e, para o caso de empreendimento com múltiplas unidades consumidoras ou geração compartilhada, acompanhada da cópia de instrumento jurídico que comprove o compromisso de solidariedade entre os integrantes; (Redação dada pela REN ANEEL 687, de 24.11.2015).

A Lei Federal n. 14.300/2022 no seu art. 12, §4º, trouxe a redução desse prazo para trinta dias, trazendo celeridade ao titular da unidade consumidora para a compensação dos seus créditos, e assim, eventualmente evitar a eventual expiração de parte desses créditos.¹⁴⁰

3.2.10 Troca de titularidade

Pela REN 482/2012, a troca de titularidade da unidade consumidora, segue a regra comum, e para efetuar essa troca deveria ser assinado pelo cliente o Contrato de Uso do Sistema de Distribuição (CUSD) e, se consumidor cativo, o Contrato de Compra de Energia Regulada (CCER), e protocolado junto à distribuidora.

A Lei Federal n. 14.300/2022 no seu art. 13 traz a garantia de que os créditos de energia elétrica serão mantidos em nome de seu titular pelo prazo regular de sessenta meses, até sua expiração, exceto se ele possuir outra unidade consumidora, que para esta poderão ser realocados. Caso o titular dos créditos possua diversas outras unidades consumidoras, e não se manifeste junto à distribuidora para qual delas ela deseja a realocação dos créditos, esta realizará automaticamente a realocação para a unidade consumidora de maior consumo e assim sucessivamente, até a compensação integral dos créditos de energia existentes.¹⁴¹

¹⁴⁰ BRASIL. CÂMARA DOS DEPUTADOS. **Lei n. 14.300, de 6 de janeiro de 2022**: Marco Legal da Microgeração e Minigeração Distribuída. Disponível em: <https://www2.camara.leg.br/legin/fed/lei/2022/lei-14300-6-janeiro-2022-792217-norma-pl.html> Acesso em: 20 jan. 2022.

Art. 12: A cada ciclo de faturamento, para cada posto tarifário, a concessionária de distribuição de energia elétrica, conforme o caso, deve apurar o montante de energia elétrica ativa consumido e o montante de energia elétrica ativa injetado na rede pela unidade consumidora com microgeração ou minigeração distribuída em sua respectiva área de concessão. [...] § 4º O consumidor-gerador titular da unidade consumidora onde se encontra instalada a microgeração ou minigeração distribuída pode solicitar alteração dos percentuais ou da ordem de utilização dos excedentes de energia elétrica ou realocar os excedentes para outra unidade consumidora do mesmo titular, de que trata o § 1º deste artigo, perante a concessionária ou permissionária de distribuição de energia elétrica, e esta terá até 30 (trinta) dias para operacionalizar o procedimento.

¹⁴¹ BRASIL. CÂMARA DOS DEPUTADOS. **Lei n. 14.300, de 6 de janeiro de 2022**: Marco Legal da Microgeração e Minigeração Distribuída. Disponível em: <https://www2.camara.leg.br/legin/fed/lei/2022/lei-14300-6-janeiro-2022-792217-norma-pl.html> Acesso em: 20 jan. 2022.

Art. 13: Os créditos de energia elétrica expiram em 60 (sessenta) meses após a data do faturamento em que foram gerados e serão revertidos em prol da modicidade tarifária sem que o consumidor participante do SCEE faça jus a qualquer forma de compensação após esse prazo. § 1º Os créditos são determinados em termos de energia elétrica ativa, não estando sua quantidade sujeita a alterações em razão da variação nos valores das tarifas de energia elétrica. § 2º Para abatimento do consumo, devem ser utilizados sempre os créditos mais antigos da unidade consumidora participante do SCEE. § 3º Os créditos de energia elétrica existentes no momento do encerramento da relação contratual do consumidor participante do SCEE perante a concessionária ou permissionária de distribuição de energia elétrica serão mantidos em nome do titular pelo prazo estabelecido no caput deste artigo, exceto se houver outra unidade consumidora sob mesma titularidade de pessoa física ou jurídica, inclusive matriz e filiais, consórcio, cooperativa ou condomínio voluntário ou edifício ou qualquer outra forma de associação civil instituída para esse fim, atendida pela mesma concessionária ou permissionária de distribuição de energia elétrica, e poderão ser, nesse caso, realocados para a respectiva unidade consumidora remanescente.

3.2.11 Garantia de fiel cumprimento

A REN 482/2012 não previa a necessidade de garantias para o cumprimento do projeto a ser aprovado. Já a Lei Federal n. 14.300/2022 traz essa exigência em seu art. 4º, dispondo que os interessados em implantar projetos de minigeração distribuída devem apresentar garantia de fiel cumprimento, conforme regulamentação da Aneel, nos seguintes montantes: “I) 2,5% (dois e meio por cento) do investimento para centrais com potência instalada superior a 500 kW (quinhentos quilowatts) e inferior a 1.000 kW (mil quilowatts); ou II) 5% (cinco por cento) do investimento para centrais com potência instalada maior ou igual a 1.000 kW (mil quilowatts)”.¹⁴²

Assim que a Aneel apresentar a regulamentação, passará a ser exigida a apresentação da garantia de fiel cumprimento. Essa exigência teve como objetivo evitar que um volume excessivo de projetos fosse apresentado no período de doze meses previstos pelo Marco Legal da GD apenas com a finalidade de garantir os benefícios do direito adquirido, e que talvez nem fossem realmente executados. Assim, com a apresentação dessa garantia de fiel cumprimento, pretendeu-se que apenas os projetos de minigeração com viabilidade de execução realizassem a solicitação de ingresso. A regulamentação a ser apresentada pela Aneel deverá esclarecer todos os procedimentos sobre como se dará a garantia de fiel cumprimento.

¹⁴² BRASIL. CÂMARA DOS DEPUTADOS. **Lei n. 14.300, de 6 de janeiro de 2022**: Marco Legal da Microgeração e Minigeração Distribuída. Disponível em: <https://www2.camara.leg.br/legin/fed/lei/2022/lei-14300-6-janeiro-2022-792217-norma-pl.html> Acesso em: 20 jan. 2022.

Art. 4º: Os interessados em implantar projetos de minigeração distribuída devem apresentar garantia de fiel cumprimento, nos seguintes montantes, conforme regulamentação da Aneel: I - 2,5% (dois e meio por cento) do investimento para centrais com potência instalada superior a 500 kW (quinhentos quilowatts) e inferior a 1.000 kW (mil quilowatts); ou II - 5% (cinco por cento) do investimento para centrais com potência instalada maior ou igual a 1.000 kW (mil quilowatts). § 1º Ficam dispensadas da obrigação de que trata o caput deste artigo as centrais de microgeração ou minigeração distribuída enquadradas na modalidade de geração compartilhada por meio da formação de consórcio ou cooperativa e enquadradas na modalidade de múltiplas unidades consumidoras. § 2º Os projetos com potência instalada superior a 500 kW (quinhentos quilowatts) que estejam com parecer de acesso válido na data de publicação desta Lei devem apresentar as garantias de fiel cumprimento na forma deste artigo em até 90 (noventa) dias, contados da publicação desta Lei. § 3º O disposto no § 2º deste artigo não se aplica caso seja celebrado contrato com a distribuidora em até 90 (noventa) dias, contados da publicação desta Lei. § 4º O não cumprimento das disposições constantes dos §§ 2º e 3º deste artigo implica o cancelamento do parecer de acesso. § 5º Os valores referentes à execução da garantia de fiel cumprimento devem ser revertidos em prol da modicidade tarifária. § 6º O interessado poderá desistir da solicitação a qualquer tempo, e a garantia de fiel cumprimento será executada caso a desistência ocorra após 90 (noventa) dias da data de emissão do parecer. § 7º A garantia de fiel cumprimento vigorará até 30 (trinta) dias após a conexão do empreendimento ao sistema de distribuição. § 8º Regulamentação da Aneel definirá as condições para execução da garantia de fiel cumprimento, bem como para restituição dos valores aos interessados, nas mesmas condições em que foi prestada.

Essa exigência não se aplica, conforme prevê o §1º do art. 4º da Lei n. 14.300/2022, para as centrais de microgeração ou minigeração distribuída enquadradas na modalidade de geração compartilhada por meio da formação de consórcio ou cooperativa e enquadradas na modalidade de múltiplas unidades consumidoras.

Se o interessado desistir da solicitação realizada, a qualquer tempo, a garantia de fiel cumprimento será executada caso a desistência ocorra após noventa dias da data de emissão do parecer. A garantia de fiel cumprimento vigorará até trinta dias após a conexão do empreendimento ao sistema de distribuição.

Conforme prevê o §5º do art. 4º da Lei n. 14.300/2022, os valores recolhidos referentes à execução da garantia de fiel cumprimento devem ser revertidos em prol da modicidade tarifária, de forma que os projetos aprovados e não executados, terão o valor dessa garantia destinado à redução do valor da tarifa. O §8º do art. 4º da Lei n. 14.300/2022, determina que a regulamentação a ser desenvolvida pela Aneel definirá as condições para execução da garantia de fiel cumprimento, bem como para restituição dos valores aos interessados, nas mesmas condições em que foi prestada.

3.2.12 B optante

Para compreensão desse assunto, preliminarmente há que se esclarecer alguns conceitos de consumidores de energia. Os consumidores ou as unidades consumidoras de energia elétrica são classificados em dois grupos: A e B.

O grupo A utiliza a chamada “alta tensão”, e é composto por unidades consumidoras que recebem energia em tensão igual ou superior a 2,3 kilovolts (kV) ou são atendidas a partir de sistema subterrâneo de distribuição em tensão secundária, caracterizado pela tarifa binômia (aplicada ao consumo e à demanda faturável). No grupo A geralmente se enquadram indústrias e estabelecimentos comerciais de médio ou grande porte.

O grupo B utiliza a chamada “baixa tensão”, e é caracterizado por unidades consumidoras atendidas em tensão inferior a 2,3 kilovolts (kV), com tarifa monômia (aplicável apenas ao consumo). Os consumidores de energia do grupo B, estão subdivididos em quatro subgrupos: I) O consumidor do tipo B1 é o residencial; II) O consumidor rural é denominado de B2; III) Os estabelecimentos comerciais ou industriais de pequeno porte são denominados B3; IV) O consumidor B4 é a iluminação pública.

Isto posto, o entendimento anterior ao Marco Legal da GD, era no sentido de que o consumidor não poderia optar ser tarifado pelo Grupo B (B optante), utilizando usina de minigeração (acima de 75kW). Já a Lei Federal n. 14.300/2022 traz no §1º do art. 11, que as unidades consumidoras com geração local, cuja potência nominal total dos transformadores seja igual ou inferior a uma vez e meia o limite permitido para ligação de consumidores do Grupo B, podem optar por faturamento idêntico às unidades conectadas em baixa tensão, conforme regulação da Aneel.¹⁴³

Desta forma, mesmo que a unidade consumidora utilize “alta tensão”, o que a enquadra no Grupo A, mas tenha a potência limitada aos padrões do Grupo B, podendo inclusive exceder em até 50%, ela pode optar por ter um faturamento idêntico aos consumidores do Grupo B.

3.2.13 Prazo para cadastro

A REN 482/2012 previa em seu art. 7º, VIII, um prazo de sessenta dias para o titular da unidade consumidora, onde se encontrava instalada a microgeração ou minigeração distribuída, definir o percentual da energia excedente que seria destinado a cada unidade consumidora participante do sistema de compensação de energia elétrica.¹⁴⁴

¹⁴³ BRASIL. CÂMARA DOS DEPUTADOS. **Lei n. 14.300, de 6 de janeiro de 2022**: Marco Legal da Microgeração e Minigeração Distribuída. Disponível em: <https://www2.camara.leg.br/legin/fed/lei/2022/lei-14300-6-janeiro-2022-792217-norma-pl.html> Acesso em: 20 jan. 2022.

Art. 11: É vedado novo enquadramento como microgeração ou minigeração distribuída das centrais geradoras que já tenham sido objeto de registro, de concessão, de permissão ou de autorização no Ambiente de Contratação Livre (ACL) ou no Ambiente de Contratação Regulada (ACR), ou tenham entrado em operação comercial para geração de energia elétrica no ACL ou no ACR ou tenham tido sua energia elétrica contabilizada no âmbito da Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE) ou comprometida diretamente com concessionária ou permissionária de distribuição de energia elétrica, no ACR, e a concessionária ou permissionária de distribuição de energia elétrica deve identificar esses casos perante a Aneel. § 1º Unidades consumidoras com geração local, cuja potência nominal total dos transformadores seja igual ou inferior a uma vez e meia o limite permitido para ligação de consumidores do Grupo B, podem optar por faturamento idêntico às unidades conectadas em baixa tensão, conforme regulação da Aneel. § 2º É vedada a divisão de central geradora em unidades de menor porte para se enquadrar nos limites de potência para microgeração ou minigeração distribuída.

¹⁴⁴ ANEEL. AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução Normativa n. 482, de 17 de abril de 2012**. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf> Acesso em: 08 mar. 2022.

Art. 7º: No faturamento de unidade consumidora integrante do sistema de compensação de energia elétrica devem ser observados os seguintes procedimentos: (Redação dada pela REN ANEEL 687, de 24.11.2015.) [...] VIII - o titular da unidade consumidora onde se encontra instalada a microgeração ou minigeração distribuída deve definir o percentual da energia excedente que será destinado a cada unidade consumidora participante do sistema de compensação de energia elétrica, podendo solicitar a alteração junto à distribuidora, desde que efetuada por escrito, com antecedência mínima de 60 (sessenta) dias de sua aplicação e, para o caso de empreendimento com múltiplas unidades consumidoras ou geração compartilhada, acompanhada da cópia de instrumento jurídico que comprove o compromisso de solidariedade entre os integrantes; (Redação dada pela REN ANEEL 687, de 24.11.2015).

Conforme já dito anteriormente, a Lei Federal n. 14.300/2022 trouxe uma redução desse prazo para trinta dias, conforme disposto em seu art. 12, §4º, o que permite a rápida alteração e viabiliza a compensação, reduzindo o risco de haver a expiração de créditos de energia a compensar.¹⁴⁵

3.2.14 Programa para GD em baixa renda

A REN 482/2012 não previa programas para a utilização da geração distribuída para os usuários com os benefícios da ligação de energia para baixa renda. Para estes consumidores, a Lei Federal n. 14.300/2022 inovou instituindo o Programa de Energia Renovável Social (PERS), destinado a investimentos na instalação de sistemas fotovoltaicos e de outras fontes renováveis, na modalidade local ou remota compartilhada, aos consumidores da Subclasse Residencial Baixa Renda de que trata a Lei n. 12.212, de 20 de janeiro de 2010.¹⁴⁶

¹⁴⁵ BRASIL. CÂMARA DOS DEPUTADOS. **Lei n. 14.300, de 6 de janeiro de 2022:** Marco Legal da Microgeração e Minigeração Distribuída. Disponível em: <https://www2.camara.leg.br/legin/fed/lei/2022/lei-14300-6-janeiro-2022-792217-norma-pl.html> Acesso em: 20 jan. 2022.

Art. 12: A cada ciclo de faturamento, para cada posto tarifário, a concessionária de distribuição de energia elétrica, conforme o caso, deve apurar o montante de energia elétrica ativa consumido e o montante de energia elétrica ativa injetado na rede pela unidade consumidora com microgeração ou minigeração distribuída em sua respectiva área de concessão. [...] § 4º O consumidor-gerador titular da unidade consumidora onde se encontra instalada a microgeração ou minigeração distribuída pode solicitar alteração dos percentuais ou da ordem de utilização dos excedentes de energia elétrica ou realocar os excedentes para outra unidade consumidora do mesmo titular, de que trata o § 1º deste artigo, perante a concessionária ou permissionária de distribuição de energia elétrica, e esta terá até 30 (trinta) dias para operacionalizar o procedimento.

¹⁴⁶ BRASIL. CÂMARA DOS DEPUTADOS. **Lei n. 14.300, de 6 de janeiro de 2022:** Marco Legal da Microgeração e Minigeração Distribuída. Disponível em: <https://www2.camara.leg.br/legin/fed/lei/2022/lei-14300-6-janeiro-2022-792217-norma-pl.html> Acesso em: 20 jan. 2022.

Art. 36: Fica instituído o Programa de Energia Renovável Social (PERS), destinado a investimentos na instalação de sistemas fotovoltaicos e de outras fontes renováveis, na modalidade local ou remota compartilhada, aos consumidores da Subclasse Residencial Baixa Renda de que trata a Lei n. 12.212, de 20 de janeiro de 2010. § 1º Os recursos financeiros do PERS serão oriundos do Programa de Eficiência Energética (PEE), de fontes de recursos complementares, ou ainda de parcela de Outras Receitas das atividades exercidas pelas distribuidoras convertida para a modicidade tarifária nos processos de revisão tarifária. § 2º A distribuidora de energia elétrica deverá apresentar plano de trabalho ao Ministério de Minas e Energia que contenha, no mínimo, o investimento plurianual, as metas de instalações dos sistemas, as justificativas para classificação do rol de beneficiados, bem como a redução do volume anual do subsídio da Tarifa Social de Energia Elétrica dos consumidores participantes do PERS. § 3º A distribuidora de energia elétrica promoverá chamadas públicas para credenciamento de empresas especializadas e, posteriormente, chamadas concorrenciais para contratação de serviços com o objetivo de implementar as instalações dos sistemas fotovoltaicos, locais ou remotos, ou de outras fontes renováveis. § 4º O consumidor participante do PERS será faturado pela distribuidora de energia elétrica com base na regra do art. 17 desta Lei, e os volumes de energia excedentes oriundos da geração nas unidades atendidas pelo PERS poderão ser adquiridos pela distribuidora, conforme regulação da Aneel. § 5º Caberá à Aneel adaptar as normas pertinentes, no que couber, para viabilizar a formação dos recursos estabelecidos no § 1º deste artigo e demais medidas para a operacionalização dos procedimentos estabelecidos, e realizar o acompanhamento físico e contábil do PERS. § 6º As contratações a que se refere o § 3º deste artigo

O próprio Marco Legal da GD referido, esclarece que os recursos financeiros do PERS serão oriundos do Programa de Eficiência Energética (PEE), de fontes de recursos complementares, ou ainda de parcela de outras receitas das atividades exercidas pelas distribuidoras convertida para a modicidade tarifária nos processos de revisão tarifária, como é o caso previsto da garantia de fiel cumprimento, a ser regulamentada pela Aneel.

As distribuidoras de energia devem apresentar os planos de investimento, metas e justificativas, objetivando a redução dos subsídios da Tarifa Social de Energia Elétrica dos consumidores participantes do PERS. As distribuidoras de energia também deverão promover chamadas públicas para credenciamento de empresas especializadas, e depois chamadas concorrenciais, com o objetivo de implementar a instalação de sistemas fotovoltaicos ou de outras fontes renováveis aos participantes do PERS.

O consumidor participante do PERS será faturado pela distribuidora de energia elétrica com base na regra geral do art. 17 do Marco Legal da GD, e os créditos de energia excedentes poderão ser adquiridos pela distribuidora, conforme regulamentação a ser realizada pela Aneel, que deve ainda viabilizar a formação dos recursos do PERS, e o seu acompanhamento físico e contábil.

3.2.15 Comercialização de energia

A REN 482/2012 não permitia a comercialização dos excedentes de energia entre os consumidores, mas apenas a compensação pelo detentor dos créditos de energia, que pode utilizá-los nas suas unidades consumidoras, de forma a reduzir sua tarifa de energia elétrica.

A Lei Federal n. 14.300/2022 trouxe em seu art. 24, a determinação para que a concessionária ou permissionária de energia elétrica promova chamadas públicas para o credenciamento de interessados em comercializar os excedentes de geração de energia oriundos de projetos de microgeradores e minigeradores distribuídos, nas suas áreas de concessão, para posterior compra desses excedentes de energia, na forma de regulamentação da Aneel.¹⁴⁷

deverão ser feitas por processos de concorrência por meio de chamadas públicas, na forma da regulamentação da Aneel.

¹⁴⁷ BRASIL. CÂMARA DOS DEPUTADOS. **Lei n. 14.300, de 6 de janeiro de 2022**: Marco Legal da Microgeração e Minigeração Distribuída. Disponível em: <https://www2.camara.leg.br/legin/fed/lei/2022/lei-14300-6-janeiro-2022-792217-norma-pl.html> Acesso em: 20 jan. 2022.

Art. 24: A concessionária ou permissionária de distribuição de energia elétrica deverá promover chamadas públicas para credenciamento de interessados em comercializar os excedentes de geração de energia oriundos de

Essa será uma das mais importantes regulamentações que a Aneel deverá realizar, pois a comercialização desses créditos, além de abrir um novo mercado, atualmente inexistente, viabiliza que particulares invistam em geração de energia renovável em quantidade maior do que seu próprio consumo, já que será possível comercializar esse excedente.

Esse artigo traz uma importante conexão com a proposta desse trabalho, pois a utilização de *tokens* criptográficos pode trazer uma diversidade de benefícios nessa comercialização, como será tratado posteriormente nesse trabalho.

3.2.16 Atributos ambientais

A REN 482/2012 tinha foco em viabilizar a geração distribuída, para que esta se estabelecesse e prosperasse, de forma que os ajustes fossem acontecendo conforme o desenvolvimento dessa tecnologia. Os atributos ambientais ficaram em segundo plano naquela época, até porque inicialmente a GD tinha pouca significância no mercado.

A Lei Federal n. 14.300/2022 trouxe em seu art. 17, § 3º, a determinação que o Conselho Nacional de Política Energética (CNPE) deverá considerar todos os benefícios da GD para estabelecer as diretrizes para valoração dos custos e dos benefícios envolvidos¹⁴⁸. Assim, entende-se que os benefícios ambientais aí também devem ser valorados, pois embora estes não resultem em resultado operacional direto ao setor elétrico, têm grande valor para a sustentabilidade energética e para o desenvolvimento social e econômico.

projetos de microgeradores e minigeradores distribuídos, nas suas áreas de concessão, para posterior compra desses excedentes de energia, na forma de regulamentação da Aneel.

¹⁴⁸ BRASIL. CÂMARA DOS DEPUTADOS. **Lei n. 14.300, de 6 de janeiro de 2022**: Marco Legal da Microgeração e Minigeração Distribuída. Disponível em: <https://www2.camara.leg.br/legin/fed/lei/2022/lei-14300-6-janeiro-2022-792217-norma-pl.html> Acesso em: 20 jan. 2022.

Art. 17: Após o período de transição de que tratam os arts. 26 e 27 desta Lei, as unidades participantes do SCEE ficarão sujeitas às regras tarifárias estabelecidas pela Aneel para as unidades consumidoras com microgeração ou minigeração distribuída. § 1º As unidades consumidoras de que trata o caput deste artigo serão faturadas pela incidência, sobre a energia elétrica ativa consumida da rede de distribuição e sobre o uso ou sobre a demanda, de todas as componentes tarifárias não associadas ao custo da energia, conforme regulação da Aneel, e deverão ser abatidos todos os benefícios ao sistema elétrico propiciados pelas centrais de microgeração e minigeração distribuída. § 2º Competirá ao Conselho Nacional de Política Energética (CNPE), ouvidos a sociedade, as associações e entidades representativas, as empresas e os agentes do setor elétrico, estabelecer as diretrizes para valoração dos custos e dos benefícios da microgeração e minigeração distribuída, observados os seguintes prazos, contados da data de publicação desta Lei: I - até 6 (seis) meses para o CNPE estabelecer as diretrizes; e II - até 18 (dezoito) meses para a Aneel estabelecer os cálculos da valoração dos benefícios. § 3º No estabelecimento das diretrizes de que trata o § 2º deste artigo, o CNPE deverá considerar todos os benefícios, incluídos os locacionais da microgeração e minigeração distribuída ao sistema elétrico compreendendo as componentes de geração, perdas elétricas, transmissão e distribuição. § 4º Após o transcurso dos prazos de transição de que trata o caput deste artigo, a unidade consumidora participante ou que venha a participar do SCEE será faturada pela mesma modalidade tarifária vigente estipulada em regulação da Aneel para a sua classe de consumo, observados os princípios desta Lei.

3.2.17 Prazo para cumprimento das disposições

A REN 482/2012 não trouxe originalmente prazos para as distribuidoras se adequarem às normas administrativas e elaboração de procedimentos para a utilização da GD. Contudo, recentemente, a REN 1000 de 7 de dezembro de 2021, um mês anterior à Lei Federal n. 14.300/2022, trouxe a previsão de alguns prazos para as distribuidoras atenderem situações ligadas a GD, como por exemplo, no art. 64, I e II, onde prevê prazo de 15 ou 30 dias para conexão de unidades consumidoras com microgeração distribuída, conforme a necessidade ou não de obras no sistema.¹⁴⁹

No tocante aos prazos, a Lei Federal n. 14.300/2022 trouxe previsão para a Aneel e as concessionárias ou permissionárias de distribuição de energia elétrica, adequarem seus regulamentos, normas, procedimentos e processos em até cento e oitenta dias da data de publicação desta Lei.¹⁵⁰ Assim, nesse prazo de cento e oitenta dias, toda a normatização administrativa deverá ser atualizada, revisada e adequada ao previsto no texto legal, ainda dentro do período do chamado direito adquirido, o que deve melhorar a compreensão do regramento para os novos projetos a serem desenvolvidos utilizando a GD.

¹⁴⁹ ANEEL. AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução Normativa n. 1.000, de 7 de dezembro de 2021**. Disponível em: <https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren20211000.pdf> Acesso em: 12 fev. 2022.

¹⁵⁰ BRASIL. CÂMARA DOS DEPUTADOS. **Lei n. 14.300, de 6 de janeiro de 2022**: Marco Legal da Microgeração e Minigeração Distribuída. Disponível em: <https://www2.camara.leg.br/legin/fed/lei/2022/lei-14300-6-janeiro-2022-792217-norma-pl.html> Acesso em: 20 jan. 2022.

Art. 30: A Aneel e as concessionárias ou permissionárias de distribuição de energia elétrica, a fim de cumprir as disposições desta Lei, deverão adequar seus regulamentos, suas normas, seus procedimentos e seus processos em até 180 (cento e oitenta) dias da data de publicação desta Lei.

4 A DIGITALIZAÇÃO DO SETOR ELÉTRICO

A digitalização da informação consiste em transformar uma informação em uma informação digital, armazenável e processável por sistemas computadorizados, em *bits*, que é a menor unidade de informação digital e vale 0 ou 1. Um exemplo de fácil compreensão é uma fotografia obtida por um aparelho celular ou máquina fotográfica digital, que transforma a informação visual, obtida pela luz incidente em um sensor fotossensível, que transforma a informação visual em informação digital.

O exemplo acima da fotografia é muito útil para exemplificar outros elementos da informação digital. O cenário para o qual se aponta uma máquina fotográfica digital contém toda a informação a ser registrada, mas no processo de digitalização muitas informações podem ser perdidas, modificadas ou até mesmo inseridas. Assim, o cenário a ser registrado em uma fotografia digital pode ter maior ou menor resolução, na proporção do número de elementos fotossensíveis existentes no sensor, atualmente na faixa dos *megapixels* ou milhões de pontos. Quanto maior a resolução (número de pontos) de uma imagem, mais detalhes essa imagem conterá, contudo, quanto maior o número de pontos ou *pixels*, mais luz será necessária para que seja possível sensibilizar os sensores e assim, em ambientes de pouca luminosidade, sensores maiores ou até de menor resolução, podem obter registros melhores na digitalização do cenário fotografado.

Um simples arquivo de imagem digital pode ter diversos níveis de qualidade e precisão na transformação do cenário observado em informação digital, como apresentado. Além da resolução ou número de pontos, cada um desses pontos da imagem tem uma cor, quanto mais precisa a tonalidade da cor, mais *bits* serão necessários para armazenar essa informação.

Ou seja, um dos fatores relevantes no processo de digitalização da informação, é a precisão pretendida no registro, que pode ser influenciada por fatores como os sensores utilizados, a quantidade ou intensidade da informação a ser registrada e a qualidade geral do dispositivo digitalizador.

Outro fator relevante na digitalização são os algoritmos utilizados para processar a informação obtida pelos sensores analógico/digitais. No exemplo da fotografia, quanto maior for a resolução da imagem obtida, maior será a quantidade de pontos que constituem essa imagem, e normalmente o tamanho do arquivo digital será diretamente proporcional à quantidade de pontos que formam essa imagem. Contudo, algoritmos de compactação foram criados, de forma a reduzir o tamanho das informações digitais. Existem algoritmos que

fazem essa compactação sem nenhuma perda de qualidade da imagem, mantendo a informação exatamente como obtida, enquanto outros fazem a compactação com perdas, que eliminam, além das informações redundantes, informações que são perceptualmente não relevantes na imagem original, normalmente de tal forma que seja quase imperceptível aos olhos humanos a diferença entre uma imagem sem perda de qualidade ou com perda de qualidade.¹⁵¹

Esses algoritmos são desenvolvidos de forma a explorar características do objeto a ser digitalizado. No caso da imagem, o algoritmo pode procurar redundâncias na imagem obtida pelo sensor, de forma a registrar a informação digital completa de forma resumida no arquivo resultante. Dessa forma, é possível que um algoritmo bem desenvolvido consiga armazenar uma imagem digital de alta resolução e qualidade, em um tamanho de arquivo digital menor do que a informação bruta coletada.

O mesmo acontece com um arquivo de áudio, que transforma informação sonora do ambiente em informação digital. O som tem níveis de intensidade (volume) e frequência (grave ou agudo), e da mesma forma que a imagem, quanto maior a precisão nesses dois elementos, mais *bits* serão necessários para armazenar essa informação bruta. Os algoritmos utilizados para comprimir ou compactar esses arquivos digitais, buscam eliminar a informação inútil, tal como as frequências sonoras mais altas do que a audição humana permitiria escutar, de modo a conseguir maximizar o espaço de armazenamento digital disponível ou o volume de informação a ser transmitida em redes de dados, como a internet.

Rodrigues explica que a “transmissão de uma imagem estática via rede de computador era efetivada sequencialmente como se fazia com qualquer outro tipo de dados”, assim, quanto mais eficiente o algoritmo de compressão da imagem, menor o tamanho do arquivo gerado e por consequência, menor a quantidade de dados transmitida e o tempo demandado para isso. Ela explica ainda que já foram desenvolvidos algoritmos de compressão de dados destinados à transmissão de imagens estáticas via rede de dados, denominados “algoritmos progressivos ou iterativos”, que decompõem a imagem e a transmitem de forma não sequencial, de forma que ela vá surgindo e ganhando qualidade conforme é carregada no destino.¹⁵²

¹⁵¹ RODRIGUES, Charlana Majory de Sá. **Estudo comparativo de algoritmos de compressão de imagens para transmissão em redes de computadores**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2005. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/5622> Acesso em: 21 mar. 2022 [p. 1].

¹⁵² RODRIGUES, Charlana Majory de Sá. **Estudo comparativo de algoritmos de compressão de imagens para transmissão em redes de computadores**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade

O processo de digitalização da informação apresentado para as imagens e sons, é análogo ao processo de digitalização das informações do setor elétrico. Assim, os diferentes tipos de informação úteis ou necessários a serem digitalizados possuem características próprias no tocante a graus de precisão, que quanto maiores levarão a tamanhos de arquivos também maiores e necessidade de maior velocidade ou tempo para serem transmitidos via rede de dados.

Desta forma, uma etapa anterior a digitalização das informações deve ser realizada, que é uma análise de quais dados devem ser digitalizados, qual o nível de precisão necessário ou possível e qual a velocidade necessária da rede de dados para transmitir esse volume de informação digital no tempo necessário. Após esse estudo, podem ser criados algoritmos de compressão para esses dados ou utilizar algoritmos já existentes, de forma a maximizar a eficiência.

Assim, a digitalização da informação é a criação de uma representação digital (virtual) das informações do mundo físico (real). Essa informação digitalizada pode ser armazenada, transmitida e processada por sistemas computacionais, de modo a extrair da informação bruta coletada, vários resultados processados, que possam ser utilizados para tomada de decisão humana ou por sistemas automatizados, de forma a maximizar a eficiência do sistema elétrico. De maneira ampla, a digitalização é um conjunto de sistemas e tecnologias desenvolvidas para facilitar nossa gestão de dados, simplificando nossa relação com o meio em que vivemos.

No setor elétrico, no segmento de transmissão, por exemplo, “com a adoção de tecnologias digitais de sensoriamento nas redes e subestações de transmissão, podemos aumentar sensivelmente a vida útil dos equipamentos instalados. Hoje a digitalização permite fazer o monitoramento em tempo real desses equipamentos, antecipando os diagnósticos de ocorrências de forma remota e tornando o sistema cada vez mais eficiente, melhorando os indicadores de qualidade e disponibilidade e, trazendo maior facilidade de operação e manutenção”.¹⁵³

A transformação do setor elétrico está centrada em três pilares: a digitalização, a descentralização e a descarbonização, possibilitando que a energia utilizada seja cada vez mais renovável e sustentável. Jacobsen explica que “a digitalização é a base para o

Federal de Pernambuco. Recife, 2005. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/5622> Acesso em: 21 mar. 2022 [p. 1-2].

¹⁵³ JACOBSEN, Sergio. **A digitalização veio para revolucionar o sistema elétrico brasileiro**. Disponível em: <https://new.siemens.com/br/pt/empresa/stories/energia/digitalizacao-revoluciona-sistema-energetico-brasileiro.html> Acesso em: 21 mar. 2022.

desenvolvimento dos outros dois pilares, pois através das novas tecnologias estamos conseguindo conectar e tornar mais capilar o sistema elétrico”.¹⁵⁴

O segmento de distribuição de energia é outro que pode ser muito beneficiado pela digitalização, pois sofre com perdas técnicas e não técnicas, e atualmente em média 14% de toda energia distribuída é perdida e em algumas regiões esse índice pode chegar até a 40%. Assim, as distribuidoras apostam cada vez mais em “tecnologias que permitam o restabelecimento automático das redes e seu monitoramento, aumentando a qualidade de fornecimento de energia e garantindo informações precisas e confiáveis aos clientes”.¹⁵⁵

O Plano Nacional De Energia 2050 da EPE¹⁵⁶ (PNE 2050), explica que “a perspectiva de maior digitalização na produção e uso de energia, por meio da maior difusão das tecnologias de informação e comunicação (TIC), está associada à evolução da conectividade, coleta e análise de grande quantidade de dados e da automação. No tocante ao uso da energia, conforme demonstrado durante a crise do COVID-19, a infraestrutura de TIC já permite a realização do trabalho à distância para muitas categorias profissionais”.¹⁵⁷

O PNE 2050 propõe ainda que a “digitalização dos sistemas de energia, desde a exploração e produção de petróleo e gás natural, dutos, refinarias, passando por sistemas agrícolas para bioenergia, toda a logística de distribuição de combustíveis, unidades consumidoras das mais diversas, como plantas industriais e embarcações até residências e veículos, traz oportunidades e potenciais enormes de incremento na eficiência desses sistemas”.¹⁵⁸ Negócios baseados na apropriação desses ganhos de eficiência, como por exemplo, “a maior abertura e a maior liquidez que podem ser promovidas pela criação de sistemas digitalizados de negociação, com revelação de preços e transparência de informações em tempo real. Isto pode ser aplicado ao setor de gás natural (*hubs* virtuais com plataforma eletrônica), como ocorre em diversos países, mas ainda não implementado no Brasil”.¹⁵⁹

¹⁵⁴ JACOBSEN, Sergio. **A digitalização veio para revolucionar o sistema elétrico brasileiro**. Disponível em: <https://new.siemens.com/br/pt/empresa/stories/energia/digitalizacao-revoluciona-sistema-energetico-brasileiro.html> Acesso em: 21 mar. 2022.

¹⁵⁵ JACOBSEN, Sergio. **A digitalização veio para revolucionar o sistema elétrico brasileiro**. Disponível em: <https://new.siemens.com/br/pt/empresa/stories/energia/digitalizacao-revoluciona-sistema-energetico-brasileiro.html> Acesso em: 21 mar. 2022.

¹⁵⁶ EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Plano Nacional de Energia 2050**. Disponível em: <https://bit.ly/3v4wWgB> Acesso em: 06 mar. 2022.

¹⁵⁷ EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Plano Nacional de Energia 2050**. Disponível em: <https://bit.ly/3v4wWgB> Acesso em: 06 mar. 2022 [p. 57].

¹⁵⁸ EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Plano Nacional de Energia 2050**. Disponível em: <https://bit.ly/3v4wWgB> Acesso em: 06 mar. 2022 [p. 57].

¹⁵⁹ EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Plano Nacional de Energia 2050**. Disponível em: <https://bit.ly/3v4wWgB> Acesso em: 06 mar. 2022 [p. 57].

Nessa linha, o setor elétrico brasileiro tende a ser muito modificado pela digitalização, pois ela levará à criação de redes inteligentes que “permitirão maior capacidade de observação, melhor controle dos ativos e do seu desempenho, análise de dados a partir da operação do sistema e um sistema elétrico mais responsivo a variações de preços. Aliada aos chamados recursos energéticos distribuídos, a digitalização pode auxiliar em criar condições para a operação confiável e eficiente em contexto de maior relevância do consumidor no funcionamento do sistema”.¹⁶⁰ A própria implantação dos medidores inteligentes, “ao propiciar o fluxo bidirecional de energia, melhor gerenciamento do perfil de consumo e possibilitar a resposta da demanda, é uma das variáveis-chave para a descentralização da operação do sistema elétrico e para a criação de novas oportunidades de negócios de energia no varejo”.¹⁶¹

O PNE 2050 argumenta que a digitalização na produção e uso de energia elétrica possibilitará novos modelos de negócios, estrutura tarifária e de preços mais eficientes e o melhor gerenciamento dos diversos perfis de consumo. Recomenda acompanhar o ritmo de implantação de medição inteligente e monitorar “o impacto das novas tecnologias (*IoT*, computação na nuvem, *big data*, *data analytics*, inteligência artificial, *blockchain*, etc.) sobre o setor de energia, incluindo análise em estudos de planejamento. Por outro lado, desafios novos também aparecerão, como a vulnerabilidade a ataques cibernéticos, vis-à-vis o custo da segurança da informação, e o novo papel da operação centralizada na integridade do sistema elétrico”.¹⁶²

Como observado pelo PNE 2050, as técnicas de registro de informações baseadas em sistemas de “livro-razão distribuído” ou *Distributed Ledger*, que levaram ao desenvolvimento da *Blockchain*,¹⁶³ surgem com potencial para tratar com essas transformações, na medida em que possibilitam registros inalteráveis, rastreabilidade e verificação.

O uso dessas informações e registros deve ter grau de sigilo conforme níveis de acesso hierarquizados, para evitar abuso econômico e eventuais vantagens ilícitas que o uso dessas informações poderia trazer. O bom uso dessas informações viabiliza um novo patamar de

¹⁶⁰ EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Plano Nacional de Energia 2050**. Disponível em: <https://bit.ly/3v4wWgB> Acesso em: 06 mar. 2022 [p. 57].

¹⁶¹ EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Plano Nacional de Energia 2050**. Disponível em: <https://bit.ly/3v4wWgB> Acesso em: 06 mar. 2022 [p. 57].

¹⁶² EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Plano Nacional de Energia 2050**. Disponível em: <https://bit.ly/3v4wWgB> Acesso em: 06 mar. 2022 [p. 57].

¹⁶³ MEDIUM. **What’s the difference between blockchain & distributed ledger technology?** Disponível em: <https://medium.com/blockchain-review/whats-the-difference-between-blockchain-distributed-ledger-technology-19407f2c2216> Acesso em: 02 nov. 2019.

qualidade nas políticas públicas para o setor elétrico, em função da precisão e visualização em tempo real que essa tecnologia disponibiliza.

4.1 REGISTRO DAS INFORMAÇÕES DIGITALIZADAS

A digitalização da informação, como visto, é um requisito para operar sistemas descentralizados ou distribuídos de forma eficiente, integrando fontes de energia sustentáveis em larga escala, propiciando a descarbonização gradual do sistema elétrico.

O volume de informação criada no processo de digitalização das informações do setor elétrico será dimensionado e limitado pela capacidade de transmissão de informações em tempo real nas redes de transmissão de dados. Como já foi explicado, o nível de precisão da informação digitalizada é proporcional ao tamanho dos arquivos a serem transferidos, e assim, a precisão tende a ser limitada pela capacidade de processamento dos algoritmos de compressão de dados e da velocidade da banda das redes de dados.

Outro elemento essencial nesse processo de digitalização é o sistema de registro ou armazenamento dessas informações. Esse armazenamento deve contemplar espaço necessário em banco de dados para armazenar as informações pelo tempo em que elas têm utilidade. E com a criação de algoritmos de análise de dados cada vez mais avançados e complexos, mesmo informações mais antigas podem ser aproveitáveis para validação de modelos simulados e diagnósticos de equipamentos.

Um gerador elétrico de uma usina hidrelétrica, por exemplo, poderia ter suas informações de potência de geração durante vários anos ou décadas, conforme nível de precisão necessário. Se o registro da potência tiver uma amostragem a cada segundo, o tamanho do arquivo de registro dessa informação digitalizada será bem maior do que se a amostragem se der a cada minuto ou a cada hora. Dessa forma, utiliza-se o nível de precisão necessário para os processos informatizados que se deseja controlar.

No exemplo acima, se a amostragem ocorrer por segundo, é possível realizar a somatória da potência gerada a cada segundo e calcular a potência gerada por minuto, hora ou dia, e assim sequencialmente para tempos maiores. Contudo, se a amostragem fosse por hora, seria possível fazer uma média daquela potência para obter a potência média para cada minuto ou para cada segundo, mas não seria possível obter as informações exatas para níveis de amostragem mais precisas do que a realizada.

Dessa forma, na teoria seria interessante ter níveis maiores de precisão da informação, de maneira que os algoritmos utilizados para a análise dessa informação possam obter resultados mais precisos e eficientes. Contudo, o contraponto dessa amostragem mais precisa, é a maior necessidade de espaço de armazenamento, poder computacional para processamento dessa informação e estrutura de transmissão de dados mais robusta, e quanto maior a infraestrutura necessária, maiores os custos para a sua execução.

Assim, a digitalização encontra gargalos, que precisam ser compreendidos e dimensionados de forma a viabilizar os processos prioritários ao projeto a ser implementado. No exemplo da digitalização dos dados do gerador elétrico de uma usina hidrelétrica, essa informação poderia ter um alcance limitado fisicamente apenas à própria usina hidrelétrica, e assim, a estrutura de transmissão de dados externa à usina não seria exigida. Caso seja necessária a transmissão externa desses dados, seja para armazenamento externo ou para processamento externo dessa informação, mais infraestrutura será demandada. Se esses dados forem sigilosos, mais requisitos de segurança serão necessários, com custos adicionais. Assim, a informação digital tem que ser compreendida para viabilizar um projeto que atenda às necessidades envolvidas maximizando os recursos financeiros necessários.

Existem aspectos relevantes nesse armazenamento de informação nos bancos de dados para atingir a eficiência e a eficácia dos sistemas informatizados desenvolvidos, a fim de atender aos usuários dessa informação nos mais variados domínios de aplicação, tais como: automação, sistemas de apoio a decisões, controle de reserva de recursos, controle e planejamento de produção, alocação e estoque de recursos, entre outros.

Dentre os aspectos relevantes, é necessário observar que o projeto do banco de dados deve prever o volume de informações armazenadas em curto, médio e longo prazo, com grande capacidade de adaptação para esses três casos, bem como ter generalidade e alto grau de abstração de dados, possibilitando confiabilidade e eficiência no armazenamento dos dados.

No tocante ao armazenamento da informação digitalizada, ele pode ser realizado utilizando um banco de dados centralizado ou descentralizado. Cada uma dessas formas possui características próprias, com benefícios e problemas diferentes entre si.

4.1.1 Armazenamento centralizado das informações

Um banco de dados centralizado pode ser entendido como aquele onde os dados são armazenados num único grande computador denominado servidor de dados, que pode ser constituído de vários computadores redundantes, para evitar que falhas de *hardware* possam interromper o funcionamento ou perda de dados, mas se comporta como se fosse um único computador central que armazena e disponibiliza as informações.

O modelo de armazenamento centralizado das informações oferece ao detentor do servidor, onde são mantidos e processados os dados, um grande domínio sobre as informações, por isso é necessário ter muita confiança nessa entidade responsável. Ele também propicia uma forma eficaz de armazenar as informações e o controle do acesso às mesmas, além de reduzir a redundância dos dados pela relativa simplicidade de serem criados e mantidos. Esse modelo foi e ainda é largamente utilizado, porém, com a enorme quantidade de dados produzida e armazenada atualmente, a centralização traz algumas dificuldades, a seguir:¹⁶⁴

a) Escalabilidade: bases centralizadas possuem recursos finitos, conseqüentemente a capacidade de armazenamento e de tráfego é limitada, o que restringe sua expansão; *b) Resiliência:* os pedidos de acesso recaem sobre um único servidor, logo uma grande quantidade de pedidos pode sobrecarregá-lo e fazer com que ele deixe de responder, tornando os dados temporariamente inacessíveis; *c) Segurança:* há um único ponto de vulnerabilidade, o que facilita ataques de *hackers* maliciosos. Caso a base de dados seja perdida por algum motivo, não há nenhuma cópia para recuperar as informações. Ademais, qualquer um com acesso ao servidor central pode adicionar, remover ou alterar qualquer dado; *d) Acessibilidade:* se o acesso aos dados for requisitado de uma localização distante, um outro país por exemplo, a conexão pode se tornar um problema, aumentando o tempo de espera para o acesso. Além disso, se o armazenamento central tiver problemas, você não poderá obter suas informações a menos que eles sejam resolvidos.¹⁶⁵

Como uma analogia para compreensão, é possível pensar num banco de dados centralizado “como a única biblioteca do mundo. Além do espaço ser limitado, restringindo a quantidade de livros disponíveis (escalabilidade), se todo mundo resolvesse pegar um livro emprestado no mesmo momento, haveria fila e provavelmente falta de disponibilidade do título (resiliência). Quem quisesse ler precisaria ir até o local (acessibilidade) e caso houvesse um incêndio, não seria possível recuperar os livros queimados (segurança)”.¹⁶⁶

¹⁶⁴ FOXBIT. **O que são bases de dados centralizadas, descentralizadas e distribuídas?** Disponível em: <https://foxbit.com.br/blog/diferenca-entre-as-bases-de-dados-blockchain/> Acesso em: 23 mar. 2022.

¹⁶⁵ FOXBIT. **O que são bases de dados centralizadas, descentralizadas e distribuídas?** Disponível em: <https://foxbit.com.br/blog/diferenca-entre-as-bases-de-dados-blockchain/> Acesso em: 23 mar. 2022.

¹⁶⁶ FOXBIT. **O que são bases de dados centralizadas, descentralizadas e distribuídas?** Disponível em: <https://foxbit.com.br/blog/diferenca-entre-as-bases-de-dados-blockchain/> Acesso em: 23 mar. 2022.

4.1.2 Armazenamento descentralizado das informações

O conceito de banco de dados distribuído não é novo e pode ser explicado como uma coleção de dados pertencentes logicamente ao mesmo sistema, mas distribuídos sobre vários locais diferentes de uma rede de computadores, conectados entre si através de redes de comunicação, em que cada computador é um sistema de banco de dados, mas esses computadores concordam em cooperar entre si, de tal forma que um usuário em qualquer desses locais possa acessar qualquer dado na rede exatamente como se estivesse armazenado no próprio computador local.¹⁶⁷

A tecnologia *blockchain* é uma base de dados distribuída, e poderia se dizer que o modelo distribuído é o modelo descentralizado levado ao seu limite, com exigência de maiores esforços na construção e na atualização da base, comparando-se com o modelo centralizado temos:

a) Escalabilidade: há um aumento ainda maior dos recursos e da capacidade total, tornando-a quase ilimitada; *b) Resiliência:* cada um pode acessar a própria cópia, portanto não existe problema de sobrecarga; *c) Segurança:* os ataques *hacker* a bases distribuídas precisam ser mais complexos e são mais caros. Para destruir toda a base de dados, por exemplo, seria necessário atacar todos os nós da rede de uma vez, algo quase impossível. Se um deles for desativado por algum motivo, os outros também possuem uma cópia de toda a base, portanto as informações registradas não serão afetadas; *d) Acessibilidade:* cada um pode acessar a própria cópia da base de dados.¹⁶⁸

Regressando ao exemplo da biblioteca, “imagine que existam apenas 50 livros no mundo e que cada pessoa possua uma cópia de cada título, portanto, cada uma tem cada um desses 50 livros em sua própria casa. De certa forma, não há mais a necessidade de existirem bibliotecas, pois cada um tem a própria biblioteca em casa. Não há problemas de acessibilidade e a rede é mais segura e resiliente”.¹⁶⁹

Essa ideia de distribuir a base de dados entre uma infinidade de computadores traz uma robustez muito grande a esse banco de dados, pois eventuais falhas de *hardware* são menos relevantes, pois os dados estão replicados nos demais computadores da rede, bem

¹⁶⁷ ELLER, Nery Artur. **Estudo e implementação de um sistema de banco de dados distribuído**. Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação) – Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 1997. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/xmlui/bitstream/handle/123456789/158114/107003.pdf?sequence=1&isAllowed=y> Acesso em: 22 mar. 2022 [p. 5].

¹⁶⁸ FOXBIT. **O que são bases de dados centralizadas, descentralizadas e distribuídas?** Disponível em: <https://foxbit.com.br/blog/diferenca-entre-as-bases-de-dados-blockchain/> Acesso em: 23 mar. 2022.

¹⁶⁹ FOXBIT. **O que são bases de dados centralizadas, descentralizadas e distribuídas?** Disponível em: <https://foxbit.com.br/blog/diferenca-entre-as-bases-de-dados-blockchain/> Acesso em: 23 mar. 2022.

como a capacidade de processamento de dados dessa rede continuará nos demais computadores da mesma.

Outra vantagem é a capacidade de distribuir os dados fisicamente em uma grande região geográfica, reduzindo os pontos de gargalo nas redes de comunicação de dados, pois estes podem ser acessados de diversos computadores diferentes, distribuindo os caminhos pelos quais a informação circula pela rede, com ganhos na banda de dados e na resiliência do acesso.

Finalmente, outro ponto relevante é a segurança dos dados contra modificações fraudulentas, pois na medida em que os dados estão distribuídos numa infinidade de computadores, existe um instrumento denominado de *consenso* entre os computadores da rede *blockchain*, que verifica se as informações contidas nos nós ou computadores dessa rede são idênticas, e caso a informação esteja diferente em um dos computadores, a informação desse computador será considerada incorreta e não será aproveitada.

A tecnologia *blockchain* surgiu com essa ideia de criar um banco de dados distribuído globalmente e que comporte uma escala de milhões de dispositivos, e na qual seus dados podem ser acessados sem a ingerência de um ente centralizador. Em que pese a tecnologia *blockchain* ter surgido com o *whitepaper* do *Bitcoin*,¹⁷⁰ ela comporta qualquer tipo de informação, tais como valores, identidades, votos e também os dados oriundos da digitalização do setor elétrico, objeto deste estudo.

Uma quantidade substancial de conhecimento atual sobre a tecnologia *blockchain* vem não apenas de fontes acadêmicas tradicionais, como periódicos e anais de conferências, mas também de fóruns, *blogs*, *wikis*, *white papers* e relatórios industriais, os quais também serão utilizados nesse estudo.

4.2 USO DA TECNOLOGIA *BLOCKCHAIN* NO SETOR ELÉTRICO

A digitalização das informações do mundo físico, para serem analisadas e processadas por computadores, é necessária para que esse ambiente descentralizado proposto funcione harmoniosamente. Isto se deve ao fato de que a energia elétrica é gerada e consumida pelas cargas quase instantaneamente, por isso os sistemas de controle de geração, transmissão, distribuição e demanda de carga (consumo) devem ser gerenciados em tempo real. Pela

¹⁷⁰ NAKAMOTO, Satoshi. **Bitcoin**: a peer-to-peer electronic cash system. Disponível em: <https://bitcoin.org/bitcoin.pdf> Acesso em: 12 jan. 2022.

perspectiva econômica, essa contabilização e liquidação de créditos e débitos também devem ocorrer em tempo real, de forma que as informações dessas transações possam ser registradas eletronicamente.

Os requisitos para os futuros sistemas de energia podem ser resumidos em três princípios-chave: descarbonização, descentralização e digitalização, no entanto, a estrutura atual dos mercados de energia elétrica é inadequada para alcançar essa visão, pois a participação de pequenos *players* nos mercados está praticamente excluída e os incentivos à participação ativa dos prosumidores até agora se restringem a compensar seu próprio consumo de energia, e não ao investimento em produção de energia para comercialização. A criação de plataformas digitais transacionais descentralizadas pode permitir o comércio dos créditos de energia ponto a ponto entre os prosumidores.¹⁷¹

Os sistemas de registro de informações baseados em *Blockchain*, que é um tipo específico de livro-razão distribuído ou *Distributed Ledger*,¹⁷² parecem ser uma ótima tecnologia para o registro e disponibilização dessas informações. Um livro-razão distribuído é um banco de dados distribuído por vários nós ou dispositivos de computação. Cada nó replica e salva uma cópia idêntica do livro-razão, bem como se atualiza de forma independente, e essa é sua principal inovação, por não ser mantida por nenhuma autoridade central, e assim consegue reduzir drasticamente o custo da confiança na informação.¹⁷³

A *blockchain* possui uma estrutura que a torna distinta dos outros tipos de livro-razão distribuídos, pois seus dados são agrupados e organizados em blocos, que são então ligados entre si por um código *hash* e protegidos usando criptografia. Uma *blockchain* é uma lista crescente de registros e sua estrutura somente de anexação permite que os dados sejam adicionados ao banco de dados, mas é impossível alterar ou excluir dados inseridos nos blocos anteriores. A tecnologia *Blockchain* é, portanto, adequada para registrar eventos, gerenciar registros, processar transações e rastrear ativos.¹⁷⁴

¹⁷¹ ANDONI, Merlinda *et al.* Blockchain technology in the energy sector: A systematic review of challenges and opportunities. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 100, Feb. 2019, pp. 143-174. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032118307184?via%3Dihub> Acesso em: 28 mar. 2022.

¹⁷² MEDIUM. **What's the difference between blockchain & distributed ledger technology?** Disponível em: <https://medium.com/blockchain-review/whats-the-difference-between-blockchain-distributed-ledger-technology-19407f2c2216> Acesso em: 02 nov. 2019.

¹⁷³ GOMES, Ezequiel. **A diferença entre “blockchain” e “DLT” (tecnologia distribuída de livro-razão).** Publicado em 27/05/2018, no portal Guia do Bitcoin. Disponível em: <https://guiadobitcoin.com.br/a-diferenca-entre-blockchain-e-dlt-tecnologia-distribuida-de-livro-razao/> Acesso em: 03 nov. 2019.

¹⁷⁴ GOMES, Ezequiel. **A diferença entre “blockchain” e “DLT” (tecnologia distribuída de livro-razão).** Publicado em 27/05/2018, no portal Guia do Bitcoin. Disponível em: <https://guiadobitcoin.com.br/a-diferenca-entre-blockchain-e-dlt-tecnologia-distribuida-de-livro-razao/> Acesso em: 03 nov. 2019.

As plataformas digitais estão na agenda global das empresas em função do princípio implícito da eficiência de recursos que elas propiciam e trouxeram negócios inovadores e desenvolvimento econômico, não se constituindo em uma moda passageira, mas uma ruptura tecnológica e uma tendência econômica. Os ecossistemas emergentes das plataformas digitais, como o *smart grid* e similares, estão gradualmente começando a cumprir as tão anunciadas promessas de potencial comercial e sustentabilidade, tanto ambiental quanto social. Agora estão começando a investir em eficiência e serviços de valor agregado, e ao fazer isso, estão desafiando e rompendo as fronteiras da indústria convencional e construindo novas estruturas de valor externas aos seus parques de infraestrutura física.¹⁷⁵

No processo de desenvolvimento de plataformas digitais, os modelos de negócios estão mudando, permitindo o crescimento de escala e receita, mas também ameaçando a validade das empresas que se recusam a se adaptar. A camada física da infraestrutura convencional das indústrias estabelecidas está se tornando conectada com a nuvem, pela integração inteligente de *hardware*, *software*, sensores, dados, algoritmos e outras tecnologias, que estão se integrando nas plataformas digitais, fornecendo a capacidade de qualquer terceiro desenvolver e implantar inovações, bens e serviços complementares inteligentes.¹⁷⁶

A inserção na rede elétrica de Recursos Energéticos Distribuídos (REDs), contendo infraestrutura pública, empresarial e de prosumidores, é um exemplo de possibilidade do uso de plataformas digitais para a criação de serviços terceirizados, com grande potencial de geração de valor agregado no setor elétrico, dentre os quais poderíamos exemplificar a comercialização do excedente dos créditos de energia advindos da geração distribuída.

Nesse sentido, os dados gerados pelos Recursos Energéticos Distribuídos (REDs) são produzidos em grandes quantidades, em alta velocidade, gerados por uma multiplicidade de fontes, contendo uma variedade de informações, tais como quantidade de energia, natureza de sua origem, local e coordenadas geográficas de geração, frequência de rede, dentre outras diversas informações relevantes, se enquadrando no conceito de *Big Data*. *Big Data* é a tecnologia que permite o processamento de informações com alto desempenho e disponibilidade. São ferramentas digitais que tornam a coleta, o processamento e a

¹⁷⁵ MATTILA, Juri *et al.* **Industrial blockchain platforms: an exercise in use case development in the energy industry.** Disponível em: <https://www.econstor.eu/bitstream/10419/201258/1/ETLA-Working-Papers-43.pdf> Acesso em: 31 mar. 2022.

¹⁷⁶ MATTILA, Juri *et al.* **Industrial blockchain platforms: an exercise in use case development in the energy industry.** Disponível em: <https://www.econstor.eu/bitstream/10419/201258/1/ETLA-Working-Papers-43.pdf> Acesso em: 31 mar. 2022.

visualização de dados mais simples, padronizadas e eficazes.¹⁷⁷ Assim, os gestores podem entender com mais clareza as tendências e os padrões para suas decisões, que combinada com as novas tecnologias de Inteligência Artificial, cria oportunidades para gerar valor a partir dos dados,¹⁷⁸ respeitando as regulações e legislações de proteção de dados pessoais.¹⁷⁹

Questões emergentes estão relacionadas ao anonimato do usuário, privacidade e governança dos sistemas *blockchain*, que muitas vezes vão contra as práticas tradicionais adotadas por governos e indústria. Os esforços de desenvolvimento na área de *blockchains* e energia estão em andamento e foram documentados em alguns *white papers* e relatórios industriais, produzidos principalmente por empresas de consultoria estabelecidas. Nesse sentido, uma abordagem utilizando um ponto de vista acadêmico neutro é interessante para avaliar a relevância e aplicabilidade desta nova tecnologia para o setor de energia.¹⁸⁰

A proteção da privacidade dessa informação é tema caro ao direito, pois ao mesmo tempo em que o acesso aos dados de geração e consumo faz parte das condições para o aprimoramento das políticas públicas e do planejamento e operação do sistema, crescem as preocupações acerca de situações como invasão de privacidade e segurança da informação. Isto porque a curva de carga de cada consumidor, em conjunto com os dados gerados por seus equipamentos, pode possibilitar, por exemplo, o conhecimento dos hábitos de cada família, ou se há ou não alguém em casa.¹⁸¹ Numa indústria a redução da carga poderia levar ao entendimento que as vendas estão em baixa e a uma redução do valor das ações na bolsa de valores, ou no caso contrário, a uma valorização. Assim, essas informações têm grande relevância e devem ser protegidas.

¹⁷⁷ NEOWAY. **O que é Big Data e qual a importância de implementá-lo na empresa?** Disponível em: <https://www.neoway.com.br/o-que-e-big-data/> Acesso em: 03 nov. 2019.

¹⁷⁸ CEMIG. **Plano estratégico de inovação de tecnologia digital da Cemig (versão reduzida)**. Disponível em: <https://bit.ly/38dSTkb> Acesso em: 03 nov. 2019.

¹⁷⁹ A privacidade no Brasil tem proteção e regulação no ordenamento jurídico, do qual se pode relacionar em ordem cronológica: 1988 - Constituição Federal (art. 5º, X, XII e LXXII); 1990 – Código de Defesa do Consumidor (arts. 43 e 44); 2011 – Lei 12.414 (Lei do Cadastro Positivo); 2011 - Lei 12.527 (Lei de Acesso à Informação Pública -LAI). Entrou em vigor em 2012; 2014 – Lei 12. 956 (Marco Civil da Internet); 2018 – Lei 13. 709 (Lei Geral de Proteção de dados) inspirada no Regulamento de dados Pessoais da União Europeia.

¹⁸⁰ ANDONI, Merlinda *et al.* Blockchain technology in the energy sector: A systematic review of challenges and opportunities. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 100, Feb. 2019, pp. 143-174. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032118307184?via%3Dihub> Acesso em: 28 mar. 2022.

¹⁸¹ EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Recursos Energéticos Distribuídos: Impactos no Planejamento Energético**. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/sites-pt/sala-de-imprensa/noticias/Documents/ND%20-%20Recursos%20Energ%C3%A9ticos%20Distribu%C3%ADdos.pdf> Acesso em: 04 nov. 2019.

Essa modificação que está acontecendo no setor elétrico, onde antes os consumidores se limitavam a simples função de consumir energia da rede e pagar suas respectivas faturas de energia elétrica, e agora, com a difusão da micro e mini geração distribuída, o consumidor virou prosumidor, e pode também gerar e consumir sua própria energia, obtendo energia da rede apenas quando sua geração seja inferior ao seu consumo, permite a possibilidade de utilização do *blockchain* para se transacionar essa energia excedente ao consumo.¹⁸²

Em vários países, os REDs estão cada vez mais interligados em sistemas de armazenamento e de consumo inteligente de energia. “A descentralização reduz as perdas com a transmissão, tendo em vista que a geração está mais perto dos centros consumidores, além de diminuir as emissões de carbono, devido ao aumento da participação das energias renováveis, com a geração solar e eólica representando uma fração cada vez maior do mix de geração em vários países do mundo”.¹⁸³

4.3 A TOKENIZAÇÃO DA ENERGIA

O conceito de lastro é importante para a compreensão da proposta de *tokenização*, uma vez que este é a garantia implícita de um ativo, uma medida de confiabilidade.¹⁸⁴

No caso do papel-moeda, por muito tempo o lastro foi o ouro, em função do acordo de Bretton Woods de 1944, que visava a estabilidade do sistema monetário internacional ao final da Segunda Guerra Mundial, quase em colapso naquele momento.¹⁸⁵ Então passou a ser possível ir em um banco e trocar dólares americanos por ouro. Limitava-se assim a emissão de mais papel-moeda e o inflacionamento do mesmo.

O sistema de Bretton Woods terminou quando os Estados Unidos unilateralmente pararam de aceitar a conversão do dólar em ouro no início dos anos 1970, de forma que o dólar americano não mais ficou vinculado a uma quantidade específica de ouro estipulada pelo governo americano. “Neste momento o que circulava na economia americana e nas

¹⁸² CASTRO, Nivalde de; LIMA, Antônio; PEREIRA, Guillermo. **Perspectivas da tecnologia blockchain no Setor Elétrico:** Aplicações na Europa, na Austrália e nos Estados Unidos. GESEL – Grupo de Estudos do Setor Elétrico (UFRJ). Artigo publicado pela Agência Canal Energia. Disponível em: <https://bit.ly/37uAMXy> Acesso em: 04 nov. 2019.

¹⁸³ CASTRO, Nivalde de; LIMA, Antônio; PEREIRA, Guillermo. **Perspectivas da tecnologia blockchain no Setor Elétrico:** Aplicações na Europa, na Austrália e nos Estados Unidos. GESEL – Grupo de Estudos do Setor Elétrico (UFRJ). Artigo publicado pela Agência Canal Energia. Disponível em: <https://bit.ly/37uAMXy> Acesso em: 04 nov. 2019.

¹⁸⁴ REIS, Tiago. **O que é lastro e como ele funciona para garantir o valor de um ativo.** Publicado em Suno Research. Disponível em: <https://www.sunoresearch.com.br/artigos/lastro/> Acesso em: 04 nov. 2019.

¹⁸⁵ MAFFINI, Maylin. **As tendências regulatórias das criptomoedas rumo à desmaterialização da moeda.** Dissertação (Mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Curitiba, 2020. p. 73.

outras economias eram apenas cédulas de dinheiro sem nenhum lastro, mas somente a confiança das pessoas de que com aqueles papéis conseguiriam adquirir aquilo que não produziam”¹⁸⁶ viabilizou este tipo de moeda sem lastro e emitida pelo Estado, que passou a ser chamada de moeda de curso forçado. Atualmente as moedas dos países estão lastreadas na confiabilidade que aquele país tem e na garantia de que aquele dinheiro será aceito, denominadas moedas fiduciárias.¹⁸⁷

Ao lado da moeda fiduciária e da moeda de curso forçado desenvolveu-se também a moeda bancária, também conhecida por moeda escritural ou invisível, criada através dos depósitos à vista em bancos comerciais, e não possui nenhum suporte material físico e escritural, por se tratar de registro de créditos e débitos realizados nas contas correntes pelos bancos. “Com a emissão de moeda bancária por meio de comandos digitais, ordens de pagamento e empréstimos, além das reservas dos próprios bancos, a moeda bancária passou a ser a maior parcela dos meios de pagamento de todos os países do mundo atuantes no mercado monetário”.¹⁸⁸

Vaddepalli e Antoney explicam que na teoria econômica clássica, o valor de uma moeda é determinado pelas forças invisíveis da oferta e da demanda, que é tecnicamente conhecido como mecanismo de preços. O preço será fixado em um ponto de equilíbrio onde a demanda iguala a oferta, e qualquer outro preço fora deste ponto de equilíbrio não perdura em longo prazo.¹⁸⁹

Maffini explica que a evolução da moeda do metal para a moeda escritural até chegar a moeda fiduciária “traz uma característica da sociedade como um todo, eis que *fiducia*, em latim, significa confiança, e foi desta forma que a moeda fiduciária é uma moeda cujo valor depende da confiança que a população de modo geral deposita nela. Nessa base está a principal característica da tecnologia *Blockchain* e sua utilização quando se trata de instrumento e base de pagamentos”.¹⁹⁰

¹⁸⁶ MAFFINI, Maylin. **As tendências regulatórias das criptomoedas rumo à desmaterialização da moeda.** Dissertação (Mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Curitiba, 2020. p. 73.

¹⁸⁷ DANIEL, Komesu. MUNDO DOS BANCOS. **Dinheiro e moeda: o que é e como funciona?** Disponível em: <https://mundodosbancos.com/77/dinheiro-moeda/> Acesso em: 04 nov. 2019.

¹⁸⁸ MAFFINI, Maylin. **As tendências regulatórias das criptomoedas rumo à desmaterialização da moeda.** Dissertação (Mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Curitiba, 2020. p. 73.

¹⁸⁹ VADDEPALLI, Surendar; ANTONEY, Laly. Are economic factors driving bitcoin transactions? An analysis of select economies. **Journal of Emerging Issues in Economics, Finance and Banking (JEIEFB)**, 2017, v. 6, n. 2, ISSN: 2306-367X. Disponível em: <https://bit.ly/3Mdm04y> Acesso em: 02 abr. 2022. p. 2216.

¹⁹⁰ MAFFINI, Maylin. **As tendências regulatórias das criptomoedas rumo à desmaterialização da moeda.** Dissertação (Mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Curitiba, 2020. p. 76.

Mas o conceito de lastro não se limita somente ao dinheiro. O mesmo vale para *tokens* ou criptomoedas, que é a representação digital de um valor físico: é necessário ter um lastro de valor para esse ativo, seja através da garantia de aceitação dele ou a garantia de conversibilidade, ou este ativo perde o seu valor. No caso da energia, o lastro está relacionado com o kWh e a garantia física das usinas.

O setor elétrico difere do exemplo do setor financeiro por transacionar um produto físico, a eletricidade. As transações econômicas envolvem a troca da energia transportada pela rede e não apenas valores e informações. No setor elétrico, a *blockchain* pode oferecer maneiras mais confiáveis, rápidas e econômicas para validar e registrar transações financeiras e operacionais, as quais podem incluir a compra e venda de eletricidade.

A eletricidade pode ser vista como o arquétipo de uma mercadoria perfeitamente homogênea: os consumidores nem podem distinguir a eletricidade de diferentes fontes de energia, como turbinas eólicas ou usinas a carvão.¹⁹¹ A eletricidade em si, na forma existente na natureza, “é um bem homogêneo, isto é, 1 kWh equivale a 1 kWh, e pode ser transacionado, com o *blockchain* transformando este processo econômico para uma forma digital”.¹⁹²

Contudo, a energia elétrica enquanto uma representação simbólica da realidade, seja na *tokenização* ou nos contratos, pode ser “tratada como um produto homogêneo ou heterogêneo, ou seja, quando a energia é considerada um produto homogêneo, ela não pode ser diferenciada entre os agentes, mas quando a energia é discriminada segundo sua fonte ou qualidade ela é tratada como produto heterogêneo, e existirão contratos específicos para cada classe de energia”.¹⁹³ Pode-se exemplificar com o certificado de origem da energia elétrica, que ao especificar outro elemento além da quantidade de energia, como também informação sobre sua origem, torna-o um bem heterogêneo.

A economia da eletricidade é moldada por sua física, como por exemplo, o fato da eletricidade ser consumida quase no mesmo instante de sua geração, pois armazenar eletricidade ainda é muito caro, faz com que seu preço flutue amplamente. As restrições

¹⁹¹ HIRTH, Lion; UECKERDT, Falko; EDENHOFER, Ottmar. **Why wind is not coal: On the economics of electricity.** Fondazione Eni Enrico Mattei, 2014. Disponível em: https://www.feem.it/m/publications_pages/20144161625104NDL2014-039.pdf Acesso em: 10 nov. 2019 [p. 4].

¹⁹² CASTRO, Nivalde de; LIMA, Antônio; PEREIRA, Guillermo. **Perspectivas da tecnologia blockchain no Setor Elétrico: Aplicações na Europa, na Austrália e nos Estados Unidos.** GESEL – Grupo de Estudos do Setor Elétrico (UFRJ). Artigo publicado pela Agência Canal Energia. Disponível em: <https://bit.ly/37uAMXy> Acesso em: 04 nov. 2019.

¹⁹³ SILVA, Adriano Jeronimo da. **Leilões de certificados de energia elétrica: máximo excedente versus máxima quantidade negociada.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual de Campinas, 2003. p. 54.

físicas fazem com que a eletricidade seja um bem homogêneo na sua característica de quantidade e heterogêneo em ao menos três dimensões – tempo, espaço e prazo de entrega. Conseqüentemente, diferentes tecnologias de geração, como carvão e energia eólica, produzem bens econômicos diferentes que podem ter um valor econômico marginal diferente.¹⁹⁴

Essas características da energia elétrica a tornam propícia para um sistema de *tokenização*, na medida em que isso viabiliza um sistema confiável, rápido e econômico para validar e registrar transações financeiras e operacionais. Dentre as tecnologias atualmente disponíveis para lidar com a *tokenização* do setor elétrico, a *blockchain* é a que se destaca pela confiabilidade, descentralização e economia em sua implantação. Além disso, várias plataformas já estão disponíveis e outras em desenvolvimento, que permitem com reduzidas adequações o uso do *token* de energia em contratos inteligentes e sistemas de compensação e liquidação automáticos. A *blockchain* permite ainda que esses *tokens* sejam transacionados de forma *peer-to-peer* (P2P) que significa ponto a ponto, ou seja, diretamente entre as pessoas, sem a necessidade de uma entidade controladora das operações.¹⁹⁵

4.3.1 Tecnologia *blockchain*

Uma *blockchain* é uma estrutura de dados digitais, um banco de dados compartilhado e distribuído que contém um registro de transações em contínua expansão em sua ordem cronológica. A sua estrutura de dados é um livro-razão que pode conter transações digitais, registros de dados e executáveis. As transações são agregadas em formações maiores, chamadas blocos, que são carimbados no tempo e ligados criptograficamente a blocos anteriores formando uma cadeia de registros que determina a ordem de sequenciamento de eventos ou a “cadeia de blocos”. Além de descrever a estrutura de dados em si, a terminologia também é amplamente utilizada na literatura para representar arquiteturas de consenso digital, algoritmos ou domínios de aplicações construídas em cima de tais arquiteturas.¹⁹⁶

¹⁹⁴ HIRTH, Lion; UECKERDT, Falko; EDENHOFER, Ottmar. **Why wind is not coal:** On the economics of electricity. Fondazione Eni Enrico Mattei, 2014. Disponível em: https://www.feem.it/m/publications_pages/20144161625104NDL2014-039.pdf Acesso em: 10 nov. 2019 [p. 1].

¹⁹⁵ MEARIN, Lucas. **Como o Blockchain está se tornando o 5G da indústria de pagamentos.** Disponível em: <https://computerworld.com.br/2019/03/29/como-o-blockchain-esta-se-tornando-o-5g-da-industria-de-pagamentos/> Acesso em: 09 nov. 2019.

¹⁹⁶ ANDONI, Merlinda *et al.* Blockchain technology in the energy sector: A systematic review of challenges and opportunities. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 100, Feb. 2019, pp. 143-174. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032118307184?via%3Dihub> Acesso em: 28 mar. 2022.

Andoni *et al.* explicam que a *blockchain* funciona em redes de dados digitais e que a transmissão de dados nessas redes é equivalente à cópia de dados de um lugar para o outro, por exemplo, no domínio da moeda criptográfica, isto é equivalente à cópia de moedas digitais da carteira eletrônica de um usuário para a de outro. O principal desafio reside no fato de que o sistema precisa garantir que as moedas sejam gastas apenas uma vez e que não haja duplicação de gastos. Uma solução tradicional é usar um ponto central de autoridade, como um banco central, que atua como intermediário de confiança entre as partes envolvidas na transação e cuja função é armazenar, salvaguardar o estado válido do livro-razão e manter os registros atualizados. Se várias partes precisarem escrever no livro-razão ao mesmo tempo, uma autoridade central também pode implementar o controle concomitante e consolidar as mudanças no livro-razão. Em várias ocasiões, a administração central pode não ser viável ou desejável, pois introduz custos intermediários e exige que os usuários da rede confiem em um terceiro para operar o sistema. Os sistemas centralizados também têm desvantagens significativas por constituírem um único ponto de falha, o que os torna mais vulneráveis a falhas técnicas e ataques maliciosos.¹⁹⁷

Como experiência de sucesso da tecnologia *blockchain*, pode-se ilustrar a *blockchain* do *Bitcoin*, que “encontra-se em funcionamento há mais de 10 anos, operando em regime 24/7, possibilitando a qualquer interessado a transação de frações deste ativo (até a 8ª casa decimal), com a custódia, escrituração, compensação e liquidação das ordens de transferências executadas de forma automática e eficiente pela própria rede *Blockchain*”.¹⁹⁸

Outra experiência de sucesso utilizando *blockchain* é o *Ethereum*, que é uma plataforma global de código aberto para aplicativos descentralizados, que viabiliza a escrita de um código que controla um valor digital, o qual é executado exatamente como programado e esteja acessível em qualquer lugar do mundo.¹⁹⁹ O *Ethereum* é focado na execução dos chamados “contratos inteligentes”: operações que são feitas automaticamente quando certas condições são cumpridas. “Diferente do *Bitcoin*, o *Ether* não foi criado para ser uma moeda digital, mas sim um ativo para recompensar os desenvolvedores que usam a plataforma

¹⁹⁷ ANDONI, Merlinda *et al.* Blockchain technology in the energy sector: A systematic review of challenges and opportunities. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 100, Feb. 2019, pp. 143-174. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032118307184?via%3Dihub> Acesso em: 28 mar. 2022.

¹⁹⁸ REVOREDO, Tatiana. **A tokenização do mercado de ações**. Disponível em: <https://cointimes.com.br/a-tokenizacao-do-mercado-de-acoes/> Acesso em: 09 nov. 2019.

¹⁹⁹ ETHEREUM. Disponível em: <https://ethereum.org/> Acesso em: 09 nov. 2019.

Ethereum para seus projetos. Mesmo assim, o Ethereum é uma das três moedas digitais mais negociadas do mundo”.²⁰⁰

O sucesso das criptomoedas levou a uma divulgação expressiva da tecnologia *blockchain*, que levou a um imaginário popular de que essa tecnologia poderia significar algum tipo de dispositivo mágico pelo qual todos os seus dados nunca estarão errados. A febre da mineração do *Bitcoin*, bem como a grande especulação sobre seu valor de mercado, levou a lucros e prejuízos expressivos aos investidores, com grande exposição na mídia. A realidade é que poucos entendem o que realmente é o *Bitcoin* e a tecnologia *blockchain* que o viabiliza.

Como foi explicado, a informação contida na *blockchain* é distribuída entre os computadores ou “nós” da rede, e a maneira dos computadores verificarem se alguma informação foi adulterada, é conferindo se os blocos contêm o código de fechamento igual e compatível com o conteúdo do bloco. Caso exista diferença entre os blocos, será considerado válido aquele existente no maior número de computadores. Esse sistema de verificação entre os computadores da rede é chamado de obtenção de consenso. Assim, para que um bloco seja incluído ao final da cadeia é preciso se alcançar a obtenção do consenso da maioria dos computadores participantes da rede.

Andoni *et al.* argumentam que o principal objetivo da tecnologia *blockchain* é remover a necessidade de intermediários confiáveis e substituí-los por uma rede distribuída de usuários digitais que trabalham em parceria para verificar as transações e salvaguardar a integridade do livro-razão. Ao contrário dos sistemas centralizados, cada membro da rede de *blockchain* detém sua própria cópia do livro-razão ou pode acessá-la na nuvem aberta. Como resultado, qualquer pessoa na rede pode ter acesso ao histórico de registro das transações do sistema e verificar sua validade, possibilitando um alto nível de transparência. Se a administração central for removida, o desafio reside em encontrar uma maneira eficiente de consolidar e sincronizar múltiplas cópias do livro-razão.

O processo exato de validação e consolidação do livro-razão varia para diferentes tipos de *blockchains*, porém, em princípio, os membros da rede comparam suas versões do livro-razão através de um processo intuitivamente semelhante à votação distribuída, através do qual se chega a um consenso sobre o estado válido do livro-razão. Estes mecanismos de validação são conhecidos como algoritmos de consenso distribuído. A colaboração e o

²⁰⁰ INFOMONEY. **Sobre Ethereum**. Disponível em: <https://www.infomoney.com.br/cotacoes/ethereum-eth/> Acesso em: 09 nov. 2019.

comportamento honesto dos nós distribuídos são estabelecidos por incentivos ou recompensas da teoria dos jogos. As *blockchains* são muito difíceis de serem manipuladas, sem que uma parte significativa da rede seja conivente, e assim são bastante seguros e resistentes à adulteração.²⁰¹

Dentre os elementos que garantem segurança aprimorada para as *blockchain* estão as funções de *hash* e criptografia de chave pública. As funções de *hash* criptográficas são algoritmos matemáticos ou funções unidirecionais que pegam uma entrada de informação e a transformam em uma saída de comprimento específico, por exemplo, uma série de 256 *bits*, chamada de saída de *hash*. Sua operação depende do fato de que é extremamente difícil recriar os dados de entrada originais utilizando apenas os dados do *hash*.²⁰²

Além disso, *blockchains* usam criptografia de chave pública, que é um protocolo de criptografia assimétrica, onde cada usuário possui duas chaves criptográficas compostas por caracteres numéricos ou alfanuméricos, uma é a chave privada secreta e a outra é uma chave pública, que pode ser compartilhada com outros usuários da rede. As chaves são matematicamente relacionadas de tal forma que as informações criptografadas por uma parte só podem ser descriptografadas por sua contraparte.

O uso de criptografia de chave público-privada garante a autenticação, o que significa que uma transação é iniciada pela fonte de onde ela afirma ser, e a autorização, o que significa que as ações são realizadas por usuários que têm o direito de fazê-lo. Por exemplo, a rede pode verificar a identidade do remetente, pois somente a chave pública do remetente pode descriptografar a mensagem original (criptografada e assinada digitalmente pela chave privada do remetente). Uma mensagem processada com uma chave pública só pode ser descriptografada pelo destinatário pretendido que detém a chave privada secreta. Esses e outros recursos de comunicação padrão, como validade e segurança de dados, são alcançados em sistemas *blockchain* pelo uso de comunicação P2P e outras técnicas criptográficas avançadas.²⁰³

²⁰¹ ANDONI, Merlinda *et al.* Blockchain technology in the energy sector: A systematic review of challenges and opportunities. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 100, Feb. 2019, pp. 143-174. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032118307184?via%3Dihub> Acesso em: 28 mar. 2022.

²⁰² ANDONI, Merlinda *et al.* Blockchain technology in the energy sector: A systematic review of challenges and opportunities. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 100, Feb. 2019, pp. 143-174. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032118307184?via%3Dihub> Acesso em: 28 mar. 2022.

²⁰³ ANDONI, Merlinda *et al.* Blockchain technology in the energy sector: A systematic review of challenges and opportunities. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 100, Feb. 2019, pp. 143-174. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032118307184?via%3Dihub> Acesso em: 28 mar. 2022.

Andoni *et al.* explicam que de acordo com o *UK Government Office for Science*, o real potencial das tecnologias *blockchain* somente é alcançado quando combinado com o uso de contratos inteligentes, que são programas executáveis que fazem alterações no livro-razão e podem ser acionados automaticamente se uma determinada condição for atendida, conforme convencionado entre as partes de uma transação. Os termos do contrato são registrados em linguagem de computador codificando restrições legais e termos de acordo. Os contratos inteligentes são autoexigíveis e invioláveis, trazendo benefícios significativos, como a remoção dos intermediários e reduzindo os custos de transação, contratação, execução e conformidade, viabilizando transações de baixo valor, enquanto as *blockchains* podem garantir a interoperabilidade entre os sistemas de transações.²⁰⁴

Um ponto importante a ser esclarecido, é o mecanismo de “consenso”. O consenso é a forma que os participantes da rede *blockchain* utilizam para verificar se a informação é fidedigna, sem adulteração na informação. Para melhorar o entendimento sobre a operação de sistemas *blockchain*, serão apresentados dois sistemas de *blockchain* significativos, o *Bitcoin*, que foi a primeira aplicação conhecida de *blockchains* e o *Ethereum*, uma plataforma *blockchain* baseada em contratos inteligentes.

4.3.2 *Bitcoin e Ethereum*

O *Bitcoin* foi a primeira criptomoeda existente, foi criada em 2009 após a divulgação pública de um artigo de Nakamoto,²⁰⁵ um autor cuja identidade real permanece desconhecida. Ele propôs um sistema de pagamento eletrônico distribuído em dinheiro que usa comunicação ponto a ponto (P2P) de usuários anônimos e desconhecidos da internet. O ativo digital transacionado entre usuários não é emitido ou controlado por um banco central, mas por uma rede de computadores que operam em colaboração e usam criptografia para garantir a segurança. Embora a ideia tenha enfrentado inicialmente um ceticismo generalizado, o *Bitcoin* nos últimos anos emergiu da obscuridade, seu preço se multiplicou e estava sendo negociado por aproximadamente US\$ 60.000 em novembro de 2021.²⁰⁶

²⁰⁴ ANDONI, Merlinda *et al.* Blockchain technology in the energy sector: A systematic review of challenges and opportunities. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 100, Feb. 2019, pp. 143-174. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032118307184?via%3Dihub> Acesso em: 28 mar. 2022.

²⁰⁵ NAKAMOTO, Satoshi. **Bitcoin: a peer-to-peer electronic cash system**. Disponível em: <https://bitcoin.org/bitcoin.pdf> Acesso em: 12 jan. 2022.

²⁰⁶ ANDONI, Merlinda *et al.* Blockchain technology in the energy sector: A systematic review of challenges and opportunities. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 100, Feb. 2019, pp. 143-174. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032118307184?via%3Dihub> Acesso em: 28 mar. 2022.

No sistema do *Bitcoin*, cada usuário possui uma carteira digital, onde são armazenados seus *tokens* criptográficos (*Bitcoins*), uma chave privada e uma pública. A carteira só pode ser acessada pela chave privada secreta do usuário. O endereço da carteira ou endereço *Bitcoin* é derivado da chave pública de um usuário e é usado para identificar um usuário, oferecendo um pseudônimo. Da inicialização à finalização, uma transação *Bitcoin* segue o procedimento subsequente:²⁰⁷

- a) Antes que uma transação de *Bitcoin* seja iniciada, as partes envolvidas na transação precisam conhecer os endereços públicos umas das outras;
- b) O remetente cria uma transação de saída, se moedas suficientes estiverem armazenadas em sua carteira. Uma transação contém informações sobre a quantidade de moedas negociadas e os endereços das partes transacionais;
- c) Uma transação é criptografada com a chave pública do destinatário, é assinada digitalmente pelo remetente e posteriormente transmitida para a rede *Bitcoin*;
- d) “Nós” especiais agregam todas as transações de saída nos últimos 10 minutos em um único bloco. Esses nós também são responsáveis por ajustar o processo de validação para que, em média, um bloco exija aproximadamente 10 minutos para ser validado e incluído na *blockchain*;
- e) Em seguida, nós validadores, amplamente conhecidos como mineradores, começam a competir entre si para resolver um quebra-cabeça criptográfico e ganham o direito de adicionar o bloco no livro existente e receber uma recompensa financeira composta por duas partes: uma recompensa acordada por todos os membros da rede (atualmente essa recompensa vale 6,25 *Bitcoins* toda vez que um minerador é bem-sucedido) e taxas de transação oferecidas pelas partes da transação;
- f) O minerador bem-sucedido é selecionado por um processo de seleção aleatório baseado no trabalho computacional necessário, amplamente conhecido como “prova de trabalho” ou *proof of work* (PoW);
- g) Quando um minerador é bem-sucedido, a solução é transmitida para a rede e outros mineradores começam a trabalhar no próximo bloco;

²⁰⁷ ANDONI, Merlinda *et al.* Blockchain technology in the energy sector: A systematic review of challenges and opportunities. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 100, Feb. 2019, pp. 143-174. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032118307184?via%3Dihub> Acesso em: 28 mar. 2022.

- h) Os blocos sucessivos contêm a saída de *hash* do bloco recém-validado e as suas transações. Assim os usuários podem ter certeza de que um bloco é válido, pois é computacionalmente caro de produzir e ele está vinculado a blocos anteriores. Em média, um bloco é gerado aproximadamente a cada 10 minutos.

O processo de validação é executado em paralelo por muitos mineradores, portanto, uma transação pode ser incluída em dois ou mais blocos levando a várias cadeias que precisam ser consolidadas. A estrutura resultante do *blockchain* é uma árvore de blocos e o consenso refere-se ao caminho válido da árvore desde a raiz (o bloco de origem) até a folha (o bloco que contém as transações mais recentes).²⁰⁸

A solução para esse problema é que a rede mantém o controle de várias cadeias de blocos, mas, eventualmente, os membros da rede consideram a cadeia mais longa formada ou a mais cara computacionalmente para representar o estado válido do livro-razão. Quaisquer alterações em um único bloco exigiriam esforço computacional renovado e a realização da “prova de trabalho” para todos os blocos sucessivamente anteriores até o bloco de origem. Como resultado, uma minoria computacional é superada pelo poder computacional de todos os outros mineradores verdadeiros, o que torna o *Bitcoin* muito resiliente a ataques maliciosos.²⁰⁹

Segundo Muftic²¹⁰ a maior contribuição do *Bitcoin* é a solução de como estabelecer confiança entre duas partes mutuamente desconhecidas e não relacionadas de tal forma que transações sensíveis e seguras possam ser realizadas, tais como transferência de dinheiro ou pagamentos, sem a assistência de terceiros e sem a necessidade de depositar confiança em qualquer componente do sistema, com total confiança sobre um ambiente aberto, como a internet.

²⁰⁸ ANDONI, Merlinda *et al.* Blockchain technology in the energy sector: A systematic review of challenges and opportunities. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 100, Feb. 2019, pp. 143-174. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032118307184?via%3Dihub> Acesso em: 28 mar. 2022.

²⁰⁹ ANDONI, Merlinda *et al.* Blockchain technology in the energy sector: A systematic review of challenges and opportunities. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 100, Feb. 2019, pp. 143-174. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032118307184?via%3Dihub> Acesso em: 28 mar. 2022.

²¹⁰ MUFTIC, Sead. **Overview and analysis of the concept and applications of virtual currencies**. Disponível em: <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC105207> Acesso em: 31 mar. 2022.

Vaddepalli e Antony explicam que o *Bitcoin* foi a primeira criptomoeda e introduziu o conceito de “criptoeconomia”, que seria um sistema econômico, que não é definido por sua localização geográfica, estrutura política, ou sistema jurídico, mas que utiliza técnicas criptográficas para restringir o comportamento comercial em vez de usar terceiros confiáveis.²¹¹

Andoni *et al.* ressaltam ainda que o *Bitcoin* abriu uma série de possibilidades para aplicativos inovadores baseados em *blockchain* não apenas para transações financeiras, mas também para transferência e negociação de ativos digitais, com o objetivo de garantir segurança, proteção e legitimidade, e que enquanto o *Bitcoin* representa o maior e mais estabelecido aplicativo de *blockchain* até hoje, o *Ethereum* dominou os aplicativos de *blockchain* ao lado das criptomoedas.²¹²

Nesse sentido, Andoni *et al.* explicam que o *Ethereum* é uma máquina virtual inovadora baseada em *blockchain* que vem com uma linguagem de programação incorporada e que permite aos usuários criar seus próprios aplicativos que rodam em arquiteturas *blockchain*. A principal aplicação do *Ethereum* são os contratos inteligentes e aplicativos descentralizados (DApps). DApps são aplicativos descentralizados de código aberto que podem operar de forma autônoma e sem intervenção humana, utilizando criptomoedas ou *tokens*.²¹³

O mecanismo de consenso utilizado na *blockchain* do *Bitcoin*, exige a “mineração” de um código *hash* para realizar o fechamento dos blocos de informação, e é denominado de prova de trabalho ou *Proof of Work* (PoW). A obtenção desse código *hash*, é ‘minerado’ através de uma competição entre os computadores da rede denominada prova de trabalho (*proof of work*), que consiste na resolução de um problema matemático complexo, e aquele minerador que resolver este problema receberá uma recompensa calculada em uma certa quantidade de *Bitcoins*, e assim um novo bloco é incluído na *blockchain*.²¹⁴

²¹¹ VADDEPALLI, Surendar; ANTONY, Laly. Are economic factors driving bitcoin transactions? An analysis of select economies. **Journal of Emerging Issues in Economics, Finance and Banking (JEIEFB)**, 2017, v. 6, n. 2, ISSN: 2306-367X. Disponível em: <https://bit.ly/3Mdm04y> Acesso em: 02 abr. 2022. p. 2216.

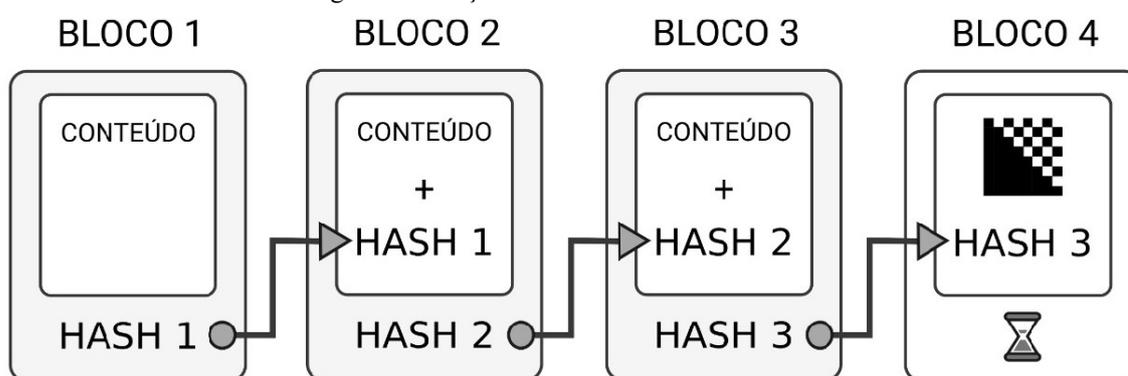
²¹² ANDONI, Merlinda *et al.* Blockchain technology in the energy sector: A systematic review of challenges and opportunities. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 100, Feb. 2019, pp. 143-174. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032118307184?via%3Dihub> Acesso em: 28 mar. 2022.

²¹³ ANDONI, Merlinda *et al.* Blockchain technology in the energy sector: A systematic review of challenges and opportunities. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 100, Feb. 2019, pp. 143-174. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032118307184?via%3Dihub> Acesso em: 28 mar. 2022.

²¹⁴ TEIDER, Josélio Jorge. **A regulamentação no Brasil dos contratos inteligentes implementados pela tecnologia blockchain**. Dissertação (Mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Curitiba, 2019. p. 24.

Após a obtenção do código *hash*, ele será conferido pelos outros nós da cadeia *Blockchain* sendo necessário um consenso da maioria dos computadores da rede. Dessa forma, a *blockchain* é constantemente replicada e mantida sempre sincronizada em todos os computadores da referida rede. Os blocos fechados são incluídos e concatenados na *blockchain* formando uma espécie de livro-razão (*ledger*) público de todas as informações, cuja cadeia de blocos está constantemente sendo incrementada, na medida em que os mineradores adicionam mais blocos a ela.²¹⁵

Figura 8 - Criação de blocos em uma *blockchain*.



Fonte: TEIDER (2019, p. 25).²¹⁶

Como os dados armazenados na *blockchain* são replicados em todos os computadores dos mineradores (*nós*) que constituem a rede, cada um desses pontos possui uma cópia da *blockchain* que é constantemente atualizado. Quando um novo nó é adicionado à infraestrutura da rede, uma cópia completa da *blockchain* é baixada automaticamente nesse computador. Isso torna os dados altamente resilientes e muito difícil de desativar uma rede *blockchain*, pela dispersão geográfica e elevado número de *nós*. Uma *blockchain* pode sobreviver mesmo se uma cópia dos dados for corrompida, se um ou mais *nós* em uma rede falharem ou se desligarem e mesmo se houver ataque externo, pois os dados podem ser recompostos e replicados pelos *nós* saudáveis.²¹⁷

²¹⁵ TEIDER, Josélio Jorge. **A regulamentação no Brasil dos contratos inteligentes implementados pela tecnologia blockchain.** Dissertação (Mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Curitiba, 2019. p. 24.

²¹⁶ TEIDER, Josélio Jorge. **A regulamentação no Brasil dos contratos inteligentes implementados pela tecnologia blockchain.** Dissertação (Mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Curitiba, 2019. p. 25.

²¹⁷ TEIDER, Josélio Jorge. **A regulamentação no Brasil dos contratos inteligentes implementados pela tecnologia blockchain.** Dissertação (Mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Curitiba, 2019. p. 25.

No modelo da *blockchain* do *Bitcoin*, o minerador recebe uma quantidade de *Bitcoins* pelo tempo e energia utilizados, e nesse processo ele também mantém a infraestrutura da rede de dados e processamento, auxilia na manutenção da segurança da rede. Contudo, “o PoW apresenta uma grande desvantagem com relação ao elevado consumo energético, criando uma enorme contradição para sua utilização no setor elétrico”.²¹⁸

Outro ponto negativo do PoW é o tempo demandado para validar o consenso, levando a uma performance muito limitada quando se trata do número de transações por segundo (TPS). Essa limitação está ligada ao fato de que o consenso nesse tipo de *blockchain* exige que antes de um novo bloco de transações seja confirmado, ele seja verificado pela maioria dos nós existentes na rede. Assim, o aspecto descentralizado da *blockchain* usando consenso PoW entrega um sistema econômico, seguro e confiável, mas também limita o potencial de uso em larga escala. Como exemplo, o tempo médio para se gravar um bloco na *blockchain* do *Bitcoin* é atualmente cerca de dez minutos.²¹⁹

Nesse sentido, dois outros algoritmos de consenso estão ganhando bastante espaço nos estudos de aplicações para o setor elétrico: Prova de Participação (ou *Proof of Stake* – PoS) e Prova de Autoridade (ou *Proof of Authority* – PoA).²²⁰

4.3.3 Modelos de consenso da *blockchain*

Como já tratado, a tecnologia *blockchain* utiliza um sistema de armazenamento descentralizado das informações, que inovou ao criar um sistema de consenso que dispensa a necessidade de um intermediário confiável para validar as novas informações que chegam para serem armazenadas, bem como para validar as informações enviadas. As informações são armazenadas e distribuídas por computadores conectados em rede ponto a ponto pela internet ou outras redes de dados, sem necessidade de um servidor principal, como nos sistemas centralizados de armazenamento de informações.²²¹

²¹⁸ GRUNWALD, Vanessa Heidrich. **Aplicações da tecnologia Blockchain na comercialização de energia no Brasil, a Singularidade da Energia, e um possível Ambiente de Contratação Distribuída – ACD**. 2018. 60 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização) - Programa FGV Management, Curitiba, 2018. p. 22.

²¹⁹ INVESTOPEDIA. **Block Time**. Disponível em: <https://www.investopedia.com/terms/b/block-time-cryptocurrency.asp> Acesso em: 10 nov. 2019.

²²⁰ GRUNWALD, Vanessa Heidrich. **Aplicações da tecnologia Blockchain na comercialização de energia no Brasil, a Singularidade da Energia, e um possível Ambiente de Contratação Distribuída – ACD**. 2018. 60 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização) - Programa FGV Management, Curitiba, 2018. p. 22.

²²¹ TEIDER, Josélio Jorge. **A regulamentação no Brasil dos contratos inteligentes implementados pela tecnologia blockchain**. Dissertação (Mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Curitiba, 2019. p. 26.

A confiança da integridade da informação armazenada é garantida por sofisticados algoritmos computacionais instalados nos computadores que constituem a rede *blockchain*, e possuem a capacidade de criar um consenso automático entre os usuários da rede para validar e confirmar a veracidade das informações que são registradas nas cadeias de blocos. Esse consenso é conseguido através de regras rígidas estabelecidas e incluídas no software da *blockchain*, que precisa ser o mesmo instalado em todos os computadores ou *nós* da rede, para que seja possível ter os mesmos critérios de consenso, e ser possível validar as informações. Normalmente as regras de consenso contêm incentivos e estruturas de custos predefinidos, o que torna difícil e custoso para qualquer um que queira adulterar dados armazenados em uma *blockchain*.²²²

Nesse sentido, Andoni *et al.* explicam que existem muitos tipos de algoritmos de consenso distribuído que estão sendo desenvolvidos, cada qual com suas peculiaridades, vantagens e desvantagens distintas, e que a metodologia usada para chegar a um consenso em redes *blockchain* determina as principais características de desempenho, como escalabilidade, velocidade de transação, finalidade de transação, segurança e gasto de recursos como eletricidade.

Todo método requer um procedimento para gerar e posteriormente aceitar um bloco, que pode ser gerado ou proposto por algum nó na rede e codifica uma série de transações. Na sequência, um passo fundamental é que o bloco proposto seja aceito pelos membros da rede, num processo chamado consenso. Uma vez que o bloco é aceito, ele se torna parte da *blockchain* e os blocos recém-gerados são criptograficamente vinculados a ele. Depois de um tempo (dependendo do algoritmo de consenso usado), o bloco se torna parte permanente da *blockchain*, ou seja, atinge a finalidade. A finalidade não exclui a existência de pequena chance estatística de que o bloco seja revertido, como parte de um *fork* futuro, ocorrendo por questão de projeto ou como resultado de um ataque. No entanto, essa chance de reversão diminui a cada novo bloco anexado e, para um sistema *blockchain* estabelecido, torna-se infinitesimalmente pequena.²²³

²²² TEIDER, Josélio Jorge. **A regulamentação no Brasil dos contratos inteligentes implementados pela tecnologia blockchain**. Dissertação (Mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Curitiba, 2019. p. 26.

²²³ ANDONI, Merlinda *et al.* Blockchain technology in the energy sector: A systematic review of challenges and opportunities. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 100, Feb. 2019, pp. 143-174. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032118307184?via%3Dihub> Acesso em: 28 mar. 2022.

Os critérios de consenso e as regras de incentivo para os mineradores, que investem na infraestrutura física da rede *blockchain*, são desenvolvidos por cientistas, pela própria comunidade participante da rede, por pesquisadores e empresas e são elaborados de tal forma que a inclusão de um novo bloco de dados depende do consenso da maioria dos outros *nós* participantes da rede, tornando assim a *blockchain* muito segura e praticamente inviolável. Para adulterar uma informação registrada na cadeia de blocos, seria necessário refazer todos os blocos anteriores até o início, ou seja, até o primeiro bloco, pois cada bloco tem um código *hash* de abertura e fechamento, que depende de cada *bit* de dado inserido em cada bloco, e assim qualquer *bit* que seja modificado, irá alterar o código de *hash* e isso leva a uma reação em cadeia que exigiria recalcular e modificar todos os blocos até o primeiro bloco da *blockchain*.

Para viabilizar a adulteração dos registros na *blockchain*, além da necessidade do recalcular os *hash* de todos os blocos, ainda seria necessário ter que convencer todos os demais *nós* da rede *blockchain*, de que aquela versão (adulterada) é a versão correta, e a maneira de se conseguir isso seria provavelmente que a maioria dos *nós* da rede (mais de 50%) contivesse a informação adulterada. Se a rede *blockchain* for pequena, com poucos computadores, seria possível ingressar com uma quantidade de *nós* superiores a 50% ao total dos *nós* da rede, e inserir a informação adulterada, levando a rede a acreditar que aquele seria o banco de dados correto. Contudo, numa rede de milhares ou milhões de *nós* como a do *Bitcoin*, por exemplo, isso é quase impossível de se conseguir.

Andoni *et al.* argumentam que chegar a um consenso sobre quais blocos ou transações aceitar como válidos em um sistema distribuído é um desafio. Os algoritmos de consenso devem ser resilientes a falhas de *nós*, atrasos de mensagens e mensagens corrompidas, bem como os *nós* não confiáveis, que não respondem ou mesmo os deliberadamente maliciosos. Elas explicam que várias abordagens para o problema do consenso têm sido propostas, onde alguns autores classificam estas formas de consenso como baseados em loteria ou baseados em votação, sendo que as abordagens baseadas em loteria incluem *blockchains* públicas de prova de trabalho (PoW) (que é utilizado pela maioria dos sistemas de criptomoedas, como *Bitcoin* ou *Ethereum*). Em sistemas PoW o algoritmo recompensa os participantes que resolvem quebra-cabeças criptográficos para validar transações e criar novos blocos. Outra alternativa são os sistemas de prova de participação ou *proof of stake* (PoS), em que os validadores são selecionados aleatoriamente ou por meio de um mecanismo chamado *Round-*

Robin,²²⁴ mas fundamentalmente o peso do “voto” de cada validador depende do tamanho de sua “aposta” no sistema - definida, por exemplo, pela quantidade de criptomoedas mantida em depósito ou outra mercadoria.²²⁵

Andoni *et al.* explicam que a validação e a cooperação dentro da rede geralmente exigem gasto de recursos, e assim, o comportamento honesto dos nós de validação é garantido por recompensas financeiras tais como o ganho de moedas ou taxas de transação, ou contramedidas que geram algum tipo de punição tais como perder dinheiro e depósitos realizados. De qualquer forma, o projeto do mecanismo de incentivo reflete uma forma de gasto de recursos, que pode ser dinheiro, poder computacional, eletricidade, tempo, etc. Minimizar recursos ou energia gasta constitui um critério significativo para avaliar o desempenho da *blockchain*.

Os algoritmos PoW, por exemplo, são conhecidos por consumir muita energia para validar as transações, e embora essa seja uma preocupação significativa e o desperdício de recursos precise ser minimizado, também é crucial para não comprometer a segurança do sistema *blockchain*. O projeto do mecanismo de incentivos de validação pode determinar as vulnerabilidades do sistema a comportamentos maliciosos, potenciais ataques cibernéticos ou conluio. Isso resulta em um *trade-off* entre segurança e desperdício de recursos/custo. Assim, enquanto alguns autores argumentam que incentivos e recompensas são parte integrante dos sistemas *blockchain* e necessários para proteger sua segurança e integridade, outros autores afirmam que a essência das *blockchains* é puramente informacional e orientada a processos e veem as soluções *blockchain* como uma tecnologia que alcança consenso em redes P2P.²²⁶

Cabe ainda lembrar, que no caso do consenso obtido através da *proof of work*, utilizado por exemplo na *blockchain* do *Bitcoin*, a quantidade de tempo e esforço computacional demandado atualmente torna praticamente impossível realizar esse cálculo em tempo hábil para modificar toda a cadeia de blocos anteriores, antes da formação de mais um bloco a ser inserido, que demanda aproximadamente dez minutos. Após a inserção desse último bloco, toda a cadeia precisaria ser recalculada novamente.

²²⁴ Round-Robin é um algoritmo escalonador de tarefas (processos) que consiste em dividir o tempo de uso da CPU (*Central Processing Unit*).

²²⁵ ANDONI, Merlinda *et al.* Blockchain technology in the energy sector: A systematic review of challenges and opportunities. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 100, Feb. 2019, pp. 143-174. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032118307184?via%3Dihub> Acesso em: 28 mar. 2022.

²²⁶ ANDONI, Merlinda *et al.* Blockchain technology in the energy sector: A systematic review of challenges and opportunities. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 100, Feb. 2019, pp. 143-174. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032118307184?via%3Dihub> Acesso em: 28 mar. 2022.

Desta forma, a tecnologia da *blockchain* permite que os dados inseridos mantenham a segurança e a criptografia. Para isso, os mineradores fornecem poder de processamento à rede em troca de oportunidade de serem recompensados em *tokens* (ou fração destes) criados no fechamento de cada bloco. Este processo é chamado de mineração porque a recompensa é projetada para simular retornos cada vez menores, da mesma forma como ocorre na mineração de metais preciosos. No caso dos mineradores da rede do *Bitcoin*, ao conseguirem calcular o *hash* para fechamento do bloco a ser inserido na cadeia, eles ganham uma quantidade de *Bitcoin*, quantidade essa que vai diminuindo com o aumento da quantidade de blocos inseridos, tornando mais difícil minerar um bloco, o que leva a um aumento do valor do *Bitcoin*.²²⁷

Maffini explica que “o consenso é um modelo de confiança, o que significa dizer que todas as pessoas da rede, os nós, podem concordar com uma verdade única e universal, sobre quem é o dono do que, sem ter que confiar em alguém. Cada nó da rede, agindo com as mesmas informações que são transmitidas através das conexões de rede, consegue chegar à mesma conclusão e fabricar o mesmo registro público que todos os outros nós”.²²⁸

Assim, verifica-se que estratégias de alto custo podem ser inevitáveis para aplicativos públicos de *blockchain* sem confiança, como o *Bitcoin*, mas podem ser redundantes para *blockchains* privadas operando em ambientes confiáveis. As aplicações de sistemas *blockchain*, como no mundo corporativo, exigem vários requisitos dependendo de casos específicos. Vários aplicativos exigem liberação de transações em tempo real ou quase em tempo real e baixa latência. Outros aplicativos precisam ter boa escalabilidade. As abordagens tradicionais de PoW suportam plataformas abertas e resistentes à censura, mas não são adequadas para casos de uso que exigem finalização imediata da transação ou altas taxas de transação.²²⁹

As críticas ao PoW levaram à proposta de um algoritmo alternativo amplamente conhecido como prova de participação ou *proof of stake* (PoS), que substitui o trabalho computacional por um processo de seleção aleatória, onde a chance de sucesso na mineração com o PoS está proporcionalmente relacionada à riqueza dos validadores. A probabilidade de

²²⁷ MAFFINI, Maylin. **As tendências regulatórias das criptomoedas rumo à desmaterialização da moeda.** Dissertação (Mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Curitiba, 2020. p. 35.

²²⁸ MAFFINI, Maylin. **As tendências regulatórias das criptomoedas rumo à desmaterialização da moeda.** Dissertação (Mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Curitiba, 2020. p. 35.

²²⁹ ANDONI, Merlinda *et al.* Blockchain technology in the energy sector: A systematic review of challenges and opportunities. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 100, Feb. 2019, pp. 143-174. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032118307184?via%3Dihub> Acesso em: 28 mar. 2022.

gerar um bloco depende do quanto os nós de participação investiram no sistema, ou seja, na quantidade de moeda depositada.²³⁰

No sistema de PoS, não há mineradores, mas sim validadores, e para confirmar uma transação e adicioná-la a *blockchain*, eles bloqueiam parte dos fundos, convertendo-os em uma aposta que eles colocam no bloco que pode ser adicionado à rede. “Essa garantia obrigatória é fixada com o objetivo de garantir possíveis comportamentos impróprios do membro da rede. Assim, os membros competem pelo direito de confirmar e não criar um bloco”. Quanto mais moeda houver na conta do validador e maior o tempo de permanência, maior a chance de esse membro assinar o bloco e receber comissões cobradas como taxas de transação.²³¹

No que diz respeito à quantidade de transações por segundo, as *blockchains* que usam o algoritmo PoS normalmente apresentam uma performance melhor que a do *Bitcoin*. Entretanto, a diferença não é tão grande assim. Os sistemas de PoS ainda não conseguiram resolver o problema da escalabilidade de forma satisfatória. Nesse contexto, o algoritmo de PoA está atualmente sendo implementado como uma alternativa mais eficiente por que é capaz de processar um número bem maior de transações por segundo.²³²

Assim, Andoni *et al.* explicam que essa abordagem pode resultar em *blockchains* mais rápidas, com um consumo de eletricidade muito menor e uma probabilidade reduzida de um ataque de 51%. Além disso, não há necessidade de gerar constantemente novas moedas para incentivar a validação. Em vez disso, as recompensas dos mineradores são reduzidas apenas às taxas de transação e não podem obter ganhos maiores investindo em equipamentos de *hardware*. O PoS pode fazer uso de ferramentas da teoria dos jogos para evitar conluíus e centralização, penalizando assim os comportamentos desonestos e maliciosos. Os algoritmos baseados em PoS vêm em grande variedade e podem ser usados em *blockchains* públicas, onde os validadores são desconhecidos e não confiáveis, ou em configurações privadas/orientadas a negócios, onde os validadores formam um conjunto conhecido de

²³⁰ ANDONI, Merlinda *et al.* Blockchain technology in the energy sector: A systematic review of challenges and opportunities. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 100, Feb. 2019, pp. 143-174. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032118307184?via%3Dihub> Acesso em: 28 mar. 2022.

²³¹ MEDIUM. **Análise dos algoritmos de consenso.** Disponível em: <https://medium.com/@creditsbrasil/an%C3%A1lise-dos-algoritmos-de-consenso-87923a9c367b> Acesso em: 10 nov. 2019.

²³² BINANCE ACADEMY. **O que é Proof of Authority?** Disponível em: <https://www.binance.vision/pt/blockchain/proof-of-authority-explained> Acesso: em 10 nov. 2019.

entidades confiáveis. *Ethereum*, a plataforma *blockchain* mais popular para desenvolvedores de tecnologia e empresas, está planejando migrar de soluções PoW para PoS.²³³

No sistema de *proof of authority* (PoA) ou prova de autoridade, apenas os nós autorizados têm o direito de criar novos blocos. Portanto, o sistema não está baseado em resolução de enigmas computacionais e a autoridade em questão pode ser vinculada a entidades reais, como instituições governamentais. É um mecanismo criticado pelo alto grau de centralização, mas é altamente eficiente em consumo de energia e em volume de transações por segundo.²³⁴ A essência por trás do PoA é a certeza da identidade de um validador, que deve exigir um processo criterioso de verificação, de forma a garantir a integridade e confiança no sistema.²³⁵ Tem sido o mais utilizado para *blockchains* de consórcios, tais como a *Energy Web Foundation* (EWF)²³⁶ e o *Energy Blockchain Consortium* (EBC)²³⁷. A EWF explica que a substituição do mecanismo de consenso PoW pelo PoA aumentou a capacidade da rede em trinta vezes, comparado com a implementação original do *Ethereum*.²³⁸

Andoni *et al.* argumentam que a geração de blocos com PoA requer a concessão de permissão especial a um ou mais membros para fazer alterações na *blockchain*, onde por exemplo, um membro com uma chave especial pode ser responsável por gerar todos os blocos. Em sua essência, o PoA pode ser visto como um algoritmo PoS modificado, onde o interesse dos validadores é na sua própria identidade. Os membros da rede confiam nos “nós” autorizados e um bloco é aceito se a maioria dos nós autorizados assinar o bloco. Quaisquer novos validadores podem ser adicionados ao sistema via votação e embora o método represente uma abordagem mais centralizada e mais apropriada para órgãos governamentais ou reguladores, atualmente também está se mostrando popular entre as empresas de serviços públicos do setor de energia.

²³³ ANDONI, Merlinda *et al.* Blockchain technology in the energy sector: A systematic review of challenges and opportunities. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 100, Feb. 2019, pp. 143-174. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032118307184?via%3Dihub> Acesso em: 28 mar. 2022.

²³⁴ GRUNWALD, Vanessa Heidrich. **Aplicações da tecnologia Blockchain na comercialização de energia no Brasil, a Singularidade da Energia, e um possível Ambiente de Contratação Distribuída – ACD**. 2018. 60 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização) - Programa FGV Management, Curitiba, 2018. p. 24.

²³⁵ BINANCE ACADEMY. **O que é Proof of Authority?** Disponível em: <https://www.binance.vision/pt/blockchain/proof-of-authority-explained> Acesso em: 10 nov. 2019.

²³⁶ ENERGY WEB FOUNDATION. Disponível em: <https://www.energyweb.org/> Acesso em: 10 nov. 2019.

²³⁷ ENERGY BLOCKCHAIN CONSORTIUM. Disponível em: <http://energy-blockchain.org/> Acesso em: 10 nov. 2019.

²³⁸ ENERGY WEB FOUNDATION. **The Energy Web Chain**. Disponível em: <https://www.energyweb.org/wp-content/uploads/2019/05/EWF-Paper-TheEnergyWebChain-v2-201907-FINAL.pdf> Acesso em 03 nov. 2019. p. 13.

O algoritmo de consenso pode ser útil em casos de usos especiais onde a segurança e a integridade não podem ser colocadas em risco, como no caso da *blockchain* da *Energy Web* que pode atingir um tempo de confirmação de 3 a 4 segundos e pode ser dimensionado para vários milhares de transações por segundo.²³⁹

4.3.4 *Blockchain* pública e privada

Andoni *et al.* explicam que uma rede ou sistema *blockchain* pode seguir diferentes regras e arquiteturas de sistema, dependendo da operação desejada e da necessidade de uso específico. Os sistemas *blockchain* geralmente consistem em usuários e validadores de rede (mineradores). Os nós de usuário podem realizar ou receber transações e manter uma cópia do livro-razão. Além dos privilégios de acesso de leitura, os validadores são responsáveis por aprovar as modificações do livro-razão e chegar a um consenso em toda a rede sobre o estado válido do livro-razão. Dependendo da configuração do sistema, podem ser aplicados direitos de acesso e validações parciais ou universais. Todos os usuários da internet podem ingressar em um sistema público de *blockchain*, mas ao contrário, nas *blockchains* privadas o acesso é restrito apenas aos participantes autorizados. O livro-razão público é completamente distribuído e resistente à censura, pois qualquer membro da rede pode contribuir para a validação das transações. Ao contrário, no livro-razão privado, apenas certos nós validadores possuem direitos de acesso de gravação para modificar a *blockchain*.²⁴⁰

Na *blockchain* pública onde não há necessidade de permissão de acesso, os usuários e validadores são completamente desconhecidos um do outro, e assim o esforço colaborativo e a confiança necessários para o gerenciamento do registro são induzidos pelo equilíbrio e recompensas da teoria dos jogos. A estrutura de incentivos normalmente envolve o gasto de recursos como trabalho computacional, eletricidade ou penalização que visa dissuadir o comportamento egoísta. Na *blockchain* privada onde é necessária a autorização do acesso, a identidade dos usuários precisa ser conhecida, para que os nós validadores sejam aqueles conhecidos e considerados confiáveis para a inclusão de novos blocos na *blockchain*, portanto, incentivos artificiais não são necessários para garantir a operação do sistema. Por

²³⁹ ANDONI, Merlinda *et al.* Blockchain technology in the energy sector: A systematic review of challenges and opportunities. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 100, Feb. 2019, pp. 143-174. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032118307184?via%3Dihub> Acesso em: 28 mar. 2022.

²⁴⁰ ANDONI, Merlinda *et al.* Blockchain technology in the energy sector: A systematic review of challenges and opportunities. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 100, Feb. 2019, pp. 143-174. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032118307184?via%3Dihub> Acesso em: 28 mar. 2022.

consequência, a *blockchain* privada pode ser mais rápida, mais flexível e eficiente, no entanto, isso vem em detrimento da imutabilidade e resistência à censura. Além disso, algumas arquiteturas de livro-razão podem ser classificadas como *blockchains* híbridas que ficam entre *blockchains* públicas e privadas.²⁴¹

Andoni *et al.* lembram que uma rede *blockchain* pode ser projetada para um propósito geral ou para um propósito específico, tal como o *Ethereum*, projetado para acomodar uma ampla gama de casos de uso e aplicativos, e o *Bitcoin*, projetado especificamente para transações de criptomoedas, respectivamente. Em termos de governança e regras de protocolo da operação do sistema, as *blockchains* podem ser classificadas como de código aberto ou de código fechado. As arquiteturas de código aberto são abertas a todos os membros da rede e podem se beneficiar de revisão contínua e transparente por pares, debate público e tomada de decisões da comunidade. As *blockchains* com código fonte fechado operam de forma semelhante a empresas privadas, onde quaisquer mudanças nas regras de operação do sistema são decididas em privado. É importante entender que uma arquitetura de solução *blockchain* não se adapta a todos os aplicativos e casos de uso, portanto, abordagens híbridas que se situam numa faixa do espectro entre *blockchains* públicas e privadas e têm vários graus de centralização podem ser utilizadas. A arquitetura do sistema resultante e o algoritmo de consenso aplicado no ambiente do sistema são conjuntamente responsáveis pelos principais recursos de desempenho, como velocidade, escalabilidade e eficiência dos recursos gastos.²⁴²

4.3.5 Adequação da *blockchain* ao setor elétrico

Ao se considerar a aplicação de técnicas de *blockchain* a uma nova área de aplicação, surge uma pergunta natural: As *blockchains* são a tecnologia certa para enfrentar os desafios da aplicação pretendida? Para a digitalização do setor elétrico, a tecnologia *blockchain* e as estratégias de consenso distribuído apresentadas demonstram vantagens significativas se comparadas ao sistema centralizado de armazenamento, tais como maior segurança, resistência à censura e transparência, que podem ser úteis para uma variedade de aplicações e casos de uso.

²⁴¹ ANDONI, Merlinda *et al.* Blockchain technology in the energy sector: A systematic review of challenges and opportunities. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 100, Feb. 2019, pp. 143-174. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032118307184?via%3Dihub> Acesso em: 28 mar. 2022.

²⁴² ANDONI, Merlinda *et al.* Blockchain technology in the energy sector: A systematic review of challenges and opportunities. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 100, Feb. 2019, pp. 143-174. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032118307184?via%3Dihub> Acesso em: 28 mar. 2022.

As *blockchains* visam lidar com pagamentos de transações para ativos transferidos ou serviços prestados, assim, o primeiro critério a ser atendido é que esses ativos possam ser representados na forma de livro-digital ou banco de dados. Em segundo lugar, esse banco de dados precisaria ser compartilhado entre diferentes usuários e as edições no banco de dados precisam ser realizadas por várias partes simultaneamente, o que significa que as transações resultantes são interdependentes das decisões de outros usuários. Os membros da rede são desconhecidos ou não são confiáveis.

Finalmente, uma pergunta crucial a ser feita é: Por que a descentralização é necessária para o caso específico do setor elétrico? As possíveis razões para a descentralização podem ser: a redução dos custos introduzidos pelos intermediários; a obtenção de transações mais rápidas e seguras; procedimentos automatizados de liberação; resistência à censura; maior resiliência a falhas; a necessidade de cumprir a transparência; e a regulamentação e a eliminação da necessidade de contar com um intermediário confiável. Além disso, em um ambiente tão descentralizado, as *blockchains* têm a capacidade de garantir a rastreabilidade das transações (transações monetárias ou de energia) e, portanto, atingir um nível de transparência e confiança no livro-razão.²⁴³

Para a *tokenização* proposta para o setor elétrico, não seria conveniente utilizar-se as *blockchains* das criptomoedas existentes, tal como o *Bitcoin* ou o *Ethereum*. Além dos motivos estruturantes, tais como o número de transações por segundo e o elevado consumo energético, outro motivo seria a elevada flutuação de valor dessas moedas, “visto que esse cenário especulativo pode não ser atrativo num mercado de energia”.²⁴⁴

Andoni *et al.* explicam que os tomadores de decisão do setor de energia e empresas de serviços públicos afirmaram que as *blockchains* poderiam oferecer soluções para os desafios do setor de energia. A Agência Alemã de Energia²⁴⁵ afirma que as tecnologias *blockchain* têm o potencial de melhorar a eficiência das práticas e processos atuais de energia, pois podem acelerar o desenvolvimento de plataformas IoT e aplicativos digitais e também fornecer inovação no comércio de energia P2P e na geração distribuída. Além disso, eles relatam que

²⁴³ ANDONI, Merlinda *et al.* Blockchain technology in the energy sector: A systematic review of challenges and opportunities. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 100, Feb. 2019, pp. 143-174. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032118307184?via%3Dihub> Acesso em: 28 mar. 2022.

²⁴⁴ GRUNWALD, Vanessa Heidrich. **Aplicações da tecnologia Blockchain na comercialização de energia no Brasil, a Singularidade da Energia, e um possível Ambiente de Contratação Distribuída – ACD**. 2018. 60 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização) - Programa FGV Management, Curitiba, 2018. p. 27.

²⁴⁵ ENGERATI. **Blockchain Europe: Utilities pilot peer-to-peer energy trading**. Disponível em: <https://www.engerati.com/smart-infrastructure/blockchain-europe-utilities-pilot-peer-to-peer-energy-trading/> Acesso em: 10 mar. 2022.

as tecnologias *blockchain* têm o potencial de melhorar significativamente as práticas atuais das empresas de energia e das empresas de serviços públicos, melhorando os processos internos, os serviços ao cliente e reduzindo os custos.²⁴⁶

Segundo Andoni *et al.*, os sistemas de energia estão passando por uma mudança transformacional desencadeada pelo avanço dos REDs e das tecnologias de informação e comunicação. Um dos principais desafios é a emergente descentralização da geração de energia e a digitalização do sistema energético, que exige a adoção de novos paradigmas e das tecnologias distribuídas. As *blockchains* podem fornecer uma solução promissora para controlar e gerenciar sistemas de energia e microrredes complexas cada vez mais descentralizadas, integrando energias renováveis de pequena escala, geração distribuída, flexibilidade de serviços e participação do consumidor no mercado de energia.

As *blockchains* também viabilizam plataformas de negociação inovadoras, onde prosumidores e consumidores podem negociar alternadamente seu excedente de energia ou demanda flexível em uma base P2P. A participação ativa do consumidor pode ser protegida e registrada em contratos inteligentes imutáveis, transparentes e invioláveis. Habilitar essas plataformas de negociação automatizadas pode ser uma maneira eficiente de fornecer sinais de preços e informações sobre custos de energia aos consumidores, fornecendo-lhes simultaneamente incentivos para resposta da demanda e gerenciamento inteligente de suas necessidades de energia.²⁴⁷

Blockchains podem habilitar mercados locais de energia orientados ao consumidor ou microrredes que visam apoiar a geração e consumo de energia local. Um dos principais benefícios dessa abordagem é reduzir as perdas de transmissão e adiar atualizações de rede onerosas. Contudo, a energia ainda é fornecida através da rede física, e a demanda e a oferta precisam ser cuidadosamente gerenciadas e controladas para atender às restrições técnicas reais e à estabilidade do sistema de energia, e essa troca física de eletricidade pode ter inibido até agora uma maior adoção de *blockchains* no setor de energia, comparado com as aplicações no setor financeiro.

²⁴⁶ ANDONI, Merlinda *et al.* Blockchain technology in the energy sector: A systematic review of challenges and opportunities. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 100, Feb. 2019, pp. 143-174. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032118307184?via%3Dihub> Acesso em: 28 mar. 2022.

²⁴⁷ ANDONI, Merlinda *et al.* Blockchain technology in the energy sector: A systematic review of challenges and opportunities. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 100, Feb. 2019, pp. 143-174. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032118307184?via%3Dihub> Acesso em: 28 mar. 2022.

Blockchains podem registrar com segurança a propriedade e as origens da energia consumida ou fornecida. Como resultado, as soluções *blockchain* podem ser utilizadas para arranjos inteligentes de cobrança e compartilhamento de recursos, como por exemplo, o armazenamento comunitário ou microrredes, mas também para aplicações de armazenamento de dados em redes inteligentes e segurança cibernética.²⁴⁸

Os volumes de geração de energia renovável continuam a aumentar e é um desafio manter a segurança do abastecimento e melhorar a resiliência da rede. Ao facilitar e acelerar o uso dos aplicativos de IoT e ao permitir mercados de flexibilidade mais eficientes, as *blockchains* podem melhorar a resiliência da rede e a segurança do fornecimento. Um relatório do Instituto de Pesquisa Econômica finlandesa²⁴⁹ argumenta que as *blockchains* podem garantir a interoperabilidade em aplicativos de rede inteligente e IoT, oferecendo soluções abertas e transparentes. De acordo com a Deloitte,²⁵⁰ as operações do mercado da energia poderão se tornar mais transparentes e eficientes, melhorando a concorrência e facilitando a mobilidade do consumidor e a troca de fornecedores de energia. Se as oportunidades de redução de custos forem concretizadas, poder-se-ia alavancar a tecnologia para melhorar as questões de escassez de combustível e acessibilidade da energia.²⁵¹

Andoni *et al.* consideram que com as vantagens propiciadas pela tecnologia *blockchain*, é possível que ela traga soluções para todo o trilema da energia: reduzir custos otimizando processos de energia, melhorar a segurança energética em termos de segurança cibernética, mas também atuar como uma tecnologia de suporte melhorando a segurança do fornecimento e, finalmente, promover sustentabilidade, facilitando a geração renovável e soluções de baixo carbono.²⁵²

²⁴⁸ ANDONI, Merlinda *et al.* Blockchain technology in the energy sector: A systematic review of challenges and opportunities. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 100, Feb. 2019, pp. 143-174. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032118307184?via%3Dihub> Acesso em: 28 mar. 2022.

²⁴⁹ MATTILA, Juri. “The Blockchain Phenomenon” – The Disruptive Potential of Distributed Consensus Architectures. **ETLA Working Papers 38**, The Research Institute of the Finnish Economy, 2016. Disponível em: <https://ideas.repec.org/p/rif/wpaper/38.html> Acesso em: 31 mar. 2022.

²⁵⁰ DELOITTE. **Blockchain Enigma. Paradox. Opportunity**. Disponível em: <https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/uk/Documents/Innovation/deloitte-uk-blockchain-full-report.pdf> Acesso em: 31 mar. 2022.

²⁵¹ ANDONI, Merlinda *et al.* Blockchain technology in the energy sector: A systematic review of challenges and opportunities. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 100, Feb. 2019, pp. 143-174. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032118307184?via%3Dihub> Acesso em: 28 mar. 2022.

²⁵² ANDONI, Merlinda *et al.* Blockchain technology in the energy sector: A systematic review of challenges and opportunities. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 100, Feb. 2019, pp. 143-174. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032118307184?via%3Dihub> Acesso em: 28 mar. 2022.

5 APLICAÇÕES DA TOKENIZAÇÃO DO SETOR ELÉTRICO

O setor elétrico está passando por mudanças rápidas para acomodar os volumes crescentes de geração de energia elétrica renovável incorporada, como eólica e solar fotovoltaica. As fontes de energia renovável (FER) passaram por um desenvolvimento maciço nos últimos anos, possibilitado pela privatização e impulsionado por incentivos financeiros e iniciativas de política energética. As FER são variáveis, difíceis de prever e dependem das condições meteorológicas, pelo que levantam novos desafios na gestão e operação dos sistemas elétricos, uma vez que são necessárias mais medidas de flexibilidade para garantir uma operação segura e estável.²⁵³

As medidas de flexibilidade incluem a integração de serviços de abastecimento de ação rápida, resposta da demanda e armazenamento de energia. Somando-se à mudança transformacional causada pelos recursos energéticos distribuídos (REDs) e renováveis, os sistemas de energia estão à beira de entrar na era digital, e já se observam medidores inteligentes sendo instalados. Para atingir metas ambiciosas de redução de emissões de carbono, os sistemas de energia precisarão de investimentos significativos. Para moderar o investimento necessário, é preciso adotar uma gestão e controles inteligentes, tarefas que são cada vez mais desafiadoras à medida que os sistemas de energia crescem para se tornarem mais ativos, descentralizados, complexos e “multiagentes”, com um número crescente de atores e ações possíveis.²⁵⁴

A comunicação avançada e as trocas de dados entre diferentes partes da rede de energia são cada vez mais necessárias, tornando o gerenciamento e a operação central uma tarefa cada vez mais desafiadora. As técnicas de controle e gerenciamento distribuído local são fundamentais para acomodar essas tendências de descentralização e digitalização. A *blockchain* ou tecnologias de contabilidade distribuída foram projetadas principalmente para facilitar transações distribuídas removendo o gerenciamento centralizado. Como resultado, as

²⁵³ ANDONI, Merlinda *et al.* Blockchain technology in the energy sector: A systematic review of challenges and opportunities. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 100, Feb. 2019, pp. 143-174. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032118307184?via%3Dihub> Acesso em: 28 mar. 2022.

²⁵⁴ ANDONI, Merlinda *et al.* Blockchain technology in the energy sector: A systematic review of challenges and opportunities. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 100, Feb. 2019, pp. 143-174. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032118307184?via%3Dihub> Acesso em: 28 mar. 2022.

blockchains podem ajudar a enfrentar os desafios enfrentados pelos sistemas de energia descentralizados.²⁵⁵

Blockchains são estruturas ou livros de dados compartilhados e distribuídos que podem armazenar transações digitais com segurança sem usar um ponto centralizado de autoridade. Mais importante, as *blockchains* permitem a execução automatizada de contratos inteligentes em redes ponto a ponto (*peer-to-peer*, ou na forma abreviada, P2P). Alternativamente, eles podem ser vistos como bancos de dados que permitem que vários usuários façam alterações no livro-razão simultaneamente, o que poderia resultar em várias versões do livro-razão, ou seja, do arquivo de dados. Em vez de gerenciar o livro-razão por um único centro confiável, cada membro da rede individual mantém uma cópia da cadeia de registros e chega a um acordo sobre o estado válido do livro-razão com o consenso. A metodologia exata de como o consenso é alcançado é uma área de pesquisa contínua e pode diferir para se adequar a uma ampla gama de domínios de aplicação. Novas transações são vinculadas a transações anteriores por criptografia, o que torna as redes *blockchain* resilientes e seguras. Cada usuário da rede pode verificar por si mesmo se as transações são válidas, o que proporciona transparência e registros confiáveis e invioláveis.²⁵⁶

O potencial está no fato de que *blockchain* ou tecnologias de contabilidade distribuída podem redefinir a confiança digital e remover intermediários, formando um novo paradigma de gerenciamento que pode potencialmente interromper as formas tradicionais de governança. A natureza disruptiva está no potencial de substituir o controle de cima para baixo pelo consenso e também na filosofia subjacente de consenso distribuído, código aberto, transparência e tomada de decisão baseada na comunidade.²⁵⁷

²⁵⁵ ANDONI, Merlinda *et al.* Blockchain technology in the energy sector: A systematic review of challenges and opportunities. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 100, Feb. 2019, pp. 143-174. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032118307184?via%3Dihub> Acesso em: 28 mar. 2022.

²⁵⁶ ANDONI, Merlinda *et al.* Blockchain technology in the energy sector: A systematic review of challenges and opportunities. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 100, Feb. 2019, pp. 143-174. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032118307184?via%3Dihub> Acesso em: 28 mar. 2022.

²⁵⁷ ANDONI, Merlinda *et al.* Blockchain technology in the energy sector: A systematic review of challenges and opportunities. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 100, Feb. 2019, pp. 143-174. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032118307184?via%3Dihub> Acesso em: 28 mar. 2022.

5.1 POSSIBILIDADES DE UTILIZAÇÃO DA *BLOCKCHAIN* NO SETOR ELÉTRICO

A tecnologia *blockchain* pode ser aplicada a uma variedade de casos de uso relacionados às operações e processos de negócios das empresas de energia. A utilização de infraestrutura descentralizada e distribuída permite grande integração de múltiplos dispositivos e serviços ligados ao setor elétrico, dentre as quais Andoni *et al.* relacionam:²⁵⁸

- a) Faturamento: *Blockchains*, contratos inteligentes e equipamentos de medição inteligente podem realizar faturamento automatizado para consumidores e geradores distribuídos. As empresas de serviços públicos podem se beneficiar do potencial de micro pagamentos de energia, soluções de pagamento conforme o uso ou plataformas de pagamento para medidores pré-pagos.
- b) Vendas e *marketing*: As práticas de vendas podem se ajustar ao perfil energético dos consumidores, às preferências individuais e às preocupações ambientais. As *Blockchains*, em combinação com técnicas de inteligência artificial, como aprendizado de máquina, podem identificar padrões de energia do consumidor e, portanto, permitir o fornecimento de produtos de energia personalizados e de valor agregado.
- c) Negociação e mercados: as plataformas de negociação distribuídas habilitadas para *blockchain* podem interromper as operações de mercado, como gerenciamento de mercado atacadista, transações comerciais e de gerenciamento de risco. Os sistemas *blockchains* estão atualmente sendo *commodities* desenvolvidos também para negociação de certificados verdes.
- d) Automação: As *blockchains* podem melhorar o controle de sistemas de energia descentralizados e microrredes. A utilização de plataformas de comercialização de créditos de energia elétrica pode aumentar significativamente a produção e autoconsumo de energia, já que permitiria um retorno financeiro da comercialização do excedente de energia produzido pela geração distribuída, o que incentiva o investimento na geração de energia sustentável e eventualmente a modicidade das tarifas.

²⁵⁸ ANDONI, Merlinda *et al.* Blockchain technology in the energy sector: A systematic review of challenges and opportunities. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 100, Feb. 2019, pp. 143-174. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032118307184?via%3Dihub> Acesso em: 28 mar. 2022.

- e) Aplicativos de rede inteligente e transferência de dados: As *blockchains* podem ser potencialmente utilizadas para comunicação de dispositivos inteligentes, transmissão ou armazenamento de dados. Dispositivos inteligentes na rede inteligente incluem medidores inteligentes, sensores avançados, equipamentos de monitoramento de rede, sistemas de controle e gerenciamento de energia, mas também controladores de energia domésticos inteligentes e sistemas de monitoramento de edifícios. Além de fornecer transferência segura de dados, os aplicativos de rede inteligente podem se beneficiar ainda mais da padronização de dados habilitada pela tecnologia *blockchain*.
- f) Gerenciamento de grade: As *blockchains* podem auxiliar no gerenciamento de redes descentralizadas, serviços de flexibilidade ou gerenciamento de ativos. *Blockchains* podem alcançar plataformas de negociação de flexibilidade integrada e otimizar recursos flexíveis, o que poderia levar a atualizações de rede caras. Como resultado, *blockchains* também podem afetar receitas e tarifas para uso da rede.
- g) Segurança e gerenciamento de identidade: A proteção das transações e a segurança podem se beneficiar das técnicas criptográficas. A *blockchain* pode proteger a privacidade, confidencialidade de dados e gerenciamento de identidade.
- h) Compartilhamento de recursos: *Blockchains* podem oferecer soluções de cobrança para compartilhar recursos entre vários usuários, como compartilhamento de infraestrutura de carregamento de veículos elétricos, dados ou armazenamento comunitário centralizado comum.
- i) Concorrência: Os contratos inteligentes podem simplificar e acelerar a mudança de fornecedores de energia. O aumento da mobilidade no mercado pode aumentar a concorrência e potencialmente reduzir as tarifas de energia.
- j) Transparência: Registros imutáveis e processos transparentes podem melhorar significativamente a auditoria e a conformidade regulatória.

Blockchains podem habilitar e potencialmente interromper modelos de negócios estabelecidos e funções tradicionais de empresas de serviços públicos de energia. Este estudo limita-se a analisar três situações de uso da *blockchain* para o setor elétrico, sendo eles: a resposta da demanda, a comercialização de energia elétrica e os certificados de origem de energia elétrica.

5.2 TOKENIZAÇÃO E BLOCKCHAINS VOLTADOS AO SETOR ELÉTRICO

As criptomoedas são uma das aplicações mais populares e bem compreendidas do uso da tecnologia *blockchain*, e novas criptomoedas e *tokens* de energia estão surgindo cada vez mais no mercado. Andoni *et al.* explicam que a emissão de uma criptomoeda especificamente para uma aplicação no setor de energia elétrica pode ter algumas vantagens, pois a alocação e o uso desta criptomoeda podem ser atribuídos àqueles com maior participação no sistema ou que prestam o serviço socialmente mais útil (por exemplo, em uma aplicação de energia renovável, os geradores podem ser recompensados com mais unidades de criptomoeda se gerarem a energia de forma menos intensiva em carbono). As criptomoedas são usadas como um método para “*tokenizar*” ativos que visam criar novos mercados ou novos modelos de negócios baseados em copropriedade e compartilhamento de ativos. Um número crescente de empresas está usando criptomoedas como um instrumento para atrair investimentos e arrecadar fundos (também conhecido como Oferta Inicial de Moedas ou ICO). Novas criptomoedas também podem ser usadas para recompensar comportamentos desejados e facilitar investimentos em energia sustentável.²⁵⁹

Nesse sentido, a *tokenização* é uma tendência que está revolucionando o mundo dos investimentos, trazendo mais segurança, eficiência, transparência e redução de custos às operações. Basicamente, *tokenizar* um ativo significa fragmentá-lo em porções digitais criptografadas, que podem ser negociadas sem intermediários através de uma *blockchain*. Como exemplos de ativos reais que poderiam ser *tokenizados* estão imóveis, obras de arte, metais preciosos, *commodities* agrícolas, artigos colecionáveis; e como exemplos de ativos intangíveis que poderiam ser *tokenizados* pode-se citar os direitos autorais, *royalties*, participação societária, ativos financeiros e marcas registradas. Assim, com a *tokenização* de imóveis, pode-se comprar “frações” de um apartamento de alto padrão em São Paulo, por exemplo, e receber uma parte proporcional do aluguel desse imóvel.²⁶⁰

²⁵⁹ ANDONI, Merlinda *et al.* Blockchain technology in the energy sector: A systematic review of challenges and opportunities. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 100, Feb. 2019, pp. 143-174. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032118307184?via%3Dihub> Acesso em: 28 mar. 2022.

²⁶⁰ BLOXS INVESTIMENTOS. **Tokenização**: guia rápido para saber o que é e seu impacto nos investimentos. Disponível em: <https://conteudos.bloxs.com.br/tokenizacao-guia-o-que-e-e-seu-impacto-nos-investimentos> Acesso em: 09 abr. 2022.

Dessa forma, a eventual *tokenização* da propriedade de usinas de minigeração para uso compartilhado, simplificaria a distribuição dos créditos de energia do SCEE²⁶¹ aos coproprietários, facilitando também a compensação e liquidação desses créditos, já que tudo funcionaria de forma automatizada na rede *blockchain*. Ao se transferir os *tokens* de uma pessoa para outra, automaticamente esse novo proprietário começará a receber os créditos que são de direitos, proporcionalmente a quantidade de *tokens* que possui, simplificando o investimento em energia sustentável, já que é possível um grande fracionamento da propriedade, de forma que um *token* tenha um valor acessível, com dez ou cem reais, e os interessados podem ir comprando gradualmente suas cotas, sem precisar de financiamentos, e auferindo microcréditos de energia regularmente.

A *tokenização* de ativos é uma forma eficiente e segura de dar liquidez a ativos reais e financeiros, além de democratizar o acesso ao mercado de capitais, uma vez que qualquer pessoa pode investir em propriedades localizadas em qualquer lugar do mundo, de forma segura e rápida. A negociação de *tokens* não requer intermediários, já que tudo ocorre através da *blockchain*, a um custo muito menor do que no mercado financeiro tradicional. Assim, não existem despesas como custódia, emolumentos, corretagem, comissões, reduzindo expressivamente os custos de transação e com isso possibilitando as transações de valor muito pequeno. Isso viabiliza um grande fracionamento dos ativos na *tokenização*, democratizando o acesso a certos tipos de investimento que seriam inviáveis ao cidadão comum.²⁶²

Existem definições de diferentes tipos de *tokens* existentes hoje no mercado, dentre os quais pode-se citar:²⁶³

- a) *Payment tokens*, que funcionam como meios de pagamento aceitos para compra de produtos e serviços, tais como o *Bitcoin*, *Ethereum*, etc.
- b) *Utility tokens*, que são ativos com aplicações específicas, como descontos em lojas, direitos de acesso a serviços, programas de fidelidade, etc.

²⁶¹ BRASIL. CÂMARA DOS DEPUTADOS. **Lei n. 14.300, de 6 de janeiro de 2022**: Marco Legal da Microgeração e Minigeração Distribuída. Disponível em: <https://www2.camara.leg.br/legin/fed/lei/2022/lei-14300-6-janeiro-2022-792217-norma-pl.html> Acesso em: 20 jan. 2022.

Art. 1º: Para fins e efeitos desta Lei, são adotadas as seguintes definições: [...] XIV - Sistema de Compensação de Energia Elétrica (SCEE): sistema no qual a energia ativa é injetada por unidade consumidora com microgeração ou minigeração distribuída na rede da distribuidora local, cedida a título de empréstimo gratuito e posteriormente compensada com o consumo de energia elétrica ativa ou contabilizada como crédito de energia de unidades consumidoras participantes do sistema.

²⁶² BLOXS INVESTIMENTOS. **Tokenização**: guia rápido para saber o que é e seu impacto nos investimentos. Disponível em: <https://conteudos.bloxs.com.br/tokenizacao-guia-o-que-e-e-seu-impacto-nos-investimentos> Acesso em: 09 abr. 2022.

²⁶³ BLOXS INVESTIMENTOS. **Tokenização**: guia rápido para saber o que é e seu impacto nos investimentos. Disponível em: <https://conteudos.bloxs.com.br/tokenizacao-guia-o-que-e-e-seu-impacto-nos-investimentos> Acesso em: 09 abr. 2022.

- c) *Security tokens*, que são ativos financeiros muito parecidos com ações na bolsa de valores, já que permitem ter participação em empresas, fundos de investimento, etc.
- d) *NFTs – Non-fungible tokens*, que são ativos digitais únicos e insubstituíveis, que funcionam como um certificado de propriedade exclusiva sobre algo, como uma obra de arte ou um item colecionável.

A regulamentação dos *tokens* no Brasil ainda é incipiente e repleta de lacunas, que serão preenchidas com o tempo, dadas as características descentralizadas e sem fronteiras desses ativos digitais. No Brasil, a Comissão de Valores Mobiliários (CVM) é o órgão responsável por fiscalizar e disciplinar a *tokenização* de empresas e a negociação de *security tokens*.²⁶⁴

Como explicado, “*security tokens* são arquivos digitais que representam um contrato de investimento regulamentado e registrado em uma *blockchain*. São similares a uma “ação ao portador” digital e esse arquivo é imutável, o que torna a transição de valor mais segura e transparente”, trazendo vantagens competitivas devido à automatização dos processos de administração, liquidação, pagamento e transferência dos ativos, que são todos feitos via *blockchain*.²⁶⁵

Como visto, as possibilidades da *tokenização* contemplam todo o mercado, em especial estimulando o compartilhamento de propriedades, ativos financeiros e investimentos. As mesmas possibilidades são aplicáveis ao setor elétrico, onde a *tokenização* pode estimular em muito o micro investimento privado em energia sustentável e distribuída, o que até então não era viável considerando os altos valores envolvidos para a execução da infraestrutura necessária. Considerando os retornos financeiros que podem ser obtidos, uma ótima forma do cidadão poupar e investir seria em *tokens* relacionados ao setor de energia elétrica, tanto em infraestrutura de geração e distribuição, bem como nos créditos do SCEE, entre outras tantas possibilidades.

Assim, alguns projetos de *blockchain* se destacam para uso no setor elétrico, pensando em características específicas da *blockchain* conforme a aplicação para a qual ela será utilizada. A *Energy Web Foundation* (EWF) é uma dessas comunidades crescente, atualmente

²⁶⁴ BLOXS INVESTIMENTOS. **Tokenização:** guia rápido para saber o que é e seu impacto nos investimentos. Disponível em: <https://conteudos.bloxs.com.br/tokenizacao-guia-o-que-e-e-seu-impacto-nos-investimentos> Acesso em: 09 abr. 2022.

²⁶⁵ NASCIMENTO, Alex. **Tokenização de ativos alternativos é o futuro do mercado de investimentos.** Disponível em: <https://www.moneytimes.com.br/alex-nascimento-tokenizacao-de-ativos-alternativos-e-o-futuro-do-mercado-de-investimentos/> Acesso em: 09 abr. 2022.

com mais de cem participantes do mercado de energia, que busca desenvolver soluções de *blockchain* de energia ao mercado, destacando-se e assumindo certo protagonismo como uma opção para essa tecnologia descentralizada que impulsiona o futuro da energia no mundo, e assim servirá de referência nesse estudo.

Andoni *et al.* descrevem que a EWF é uma organização global sem fins lucrativos focada em acelerar a tecnologia *blockchain* em todo o setor de energia, sendo fundada pela *Grid Singularity* e pelo *Rocky Mountain Institute*, seguida por mais de vinte e quatro empresas e nove empresas afiliadas do ecossistema. A EWF garantiu US\$ 2,5 milhões em financiamento para identificar e avaliar os casos de uso mais promissores da tecnologia *blockchain* no setor de energia e lançar uma nova plataforma *blockchain* focada em energia, a *Energy Web Platform*, adequada para implementar em escala essas aplicações.²⁶⁶

A EWF utiliza uma plataforma baseada no *Ethereum*, mas ajustada para alcançar melhor escalabilidade e finalização mais rápida das transações usando um algoritmo de Prova de Autoridade, chamado Aura. Utilizando o PoA como forma de alcançar o consenso na *blockchain*, os blocos são gerados por nós especiais conhecidos como nós de autoridade de forma *round robin*,²⁶⁷ onde cada validador recebe um intervalo de tempo por rodada para criar ou assinar um novo bloco, e contemplam solução para o caso de os nós ficarem *off-line*. A plataforma também usa uma estrutura de governança dando permissões especiais em camadas de controle que podem atender a diferentes atores do sistema de energia.²⁶⁸

Sua *blockchain* denomina-se *Energy Web Chain (EW Chain)*, e é uma plataforma pública, projetada especificamente para as necessidades regulatórias, operacionais e de mercado do setor de energia. Como explicado, a *EW Chain* utiliza o mecanismo de consenso *proof of authority* (PoA), que tem eficiência energética e escalabilidade, porém é mais centralizado; foi pensado para funcionar em dispositivos com pequeno poder de processamento e memória, viabilizando os clientes leves utilizados na Internet das Coisas (IoT); também contempla níveis de acesso conforme a legislação ou regulação do local, permitindo nós governamentais, das agências reguladoras e das plataformas de aplicações, todas utilizando a mesma *blockchain*, enquanto consegue permitir a privacidade dos dados; e

²⁶⁶ ANDONI, Merlinda *et al.* Blockchain technology in the energy sector: A systematic review of challenges and opportunities. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 100, Feb. 2019, pp. 143-174. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032118307184?via%3Dihub> Acesso em: 28 mar. 2022.

²⁶⁷ Round-Robin é um algoritmo escalonador de tarefas (processos) que consiste em dividir o tempo de uso da CPU (*Central Processing Unit*).

²⁶⁸ ANDONI, Merlinda *et al.* Blockchain technology in the energy sector: A systematic review of challenges and opportunities. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 100, Feb. 2019, pp. 143-174. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032118307184?via%3Dihub> Acesso em: 28 mar. 2022.

ainda finalmente uma máquina virtual equiparada a do *Ethereum*, com o benefício de um ganho de velocidade entre 1,3 até 15 vezes a deste.²⁶⁹

Como na maioria das *blockchains* públicas, a *EW Chain* possui um *token* utilitário nativo de primeira camada, o *Energy Web Token* (EWT). O *token* tem dois objetivos principais: a) proteger a rede contra mau comportamento; e b) compensar os validadores por meio de taxas de transação e prêmios de validação de bloco. Usuários e desenvolvedores de aplicativos não precisam usar o EWT para seus próprios aplicativos, eles podem usar criptomoedas ou moedas fiduciárias, bem como *tokens* de segunda camada nativos de seus aplicativos específicos, apenas assumindo os custos de transação da *EW Chain*.²⁷⁰

Essas características relacionadas no *EW Chain* são importantes para qualquer *token* que pretenda ser utilizado no setor elétrico. Elas permitem o uso com grande volume de dados gerados e processados em tempo real, para viabilizar soluções como o comércio P2P e o gerenciamento da resposta da demanda, bem como a utilização de dispositivos de IoT para modicidade e a emissão e rastreamento de certificados de origem de energia sustentável.

5.3 RESPOSTA DA DEMANDA

A resposta da demanda é um mecanismo para gerenciar o consumo dos clientes em resposta às condições de oferta, como por exemplo, realizar a redução ou deslocamento do consumo de energia em momentos críticos por meio de pagamentos ou em resposta a preços de mercado, adicionando estabilidade ao sistema, pois a geração e o consumo devem estar equilibrados em tempo real, o que é dificultado em uma rede bidirecional de geração e consumo, onde ambos estão em constante oscilação e com a introdução das energias renováveis e intermitentes.

É preciso ter em mente que consumo e demanda de energia são coisas diferentes, embora correlacionadas. O consumo de energia é a quantidade efetivamente utilizada de energia em uma unidade consumidora e pode ser medido em kWh (quilowatt-hora). A demanda é a potência necessária para manter o consumo de energia de todos os equipamentos ligados simultaneamente, ou seja, é a velocidade com que a energia é consumida, quanto mais rapidamente a energia é consumida, maior a demanda ou a potência. Um exemplo de

²⁶⁹ ENERGY WEB FOUNDATION. **The Energy Web Chain**. Disponível em: <https://www.energyweb.org/wp-content/uploads/2019/05/EWF-Paper-TheEnergyWebChain-v2-201907-FINAL.pdf> Acesso em: 03 nov. 2019. p. 13.

²⁷⁰ ENERGY WEB FOUNDATION. **The Grid's New Digital DNA**. Disponível em: <https://www.energyweb.org/technology/energy-web-chain/> Acesso em: 16 nov. 2019.

situações de consumo de energia igual, mas com demandas diferentes, seria em uma primeira situação onde uma lâmpada de 250W fica ligada durante quatro horas, consumindo assim 1 lâmpada x 4h x 250W = 1000Wh ou 1kWh; e numa segunda situação, quatro lâmpadas de 250W ficando ligada durante uma hora, com o consumo de 4 lâmpadas x 1h x 250W = 1000Wh ou 1kWh, ou seja, as duas situações consomem a mesma quantidade de energia, mas a segunda situação tem uma demanda quatro vezes maior, pois consome a mesma energia em apenas uma hora, enquanto a primeira leva quatro horas para consumir 1kWh.

Ocorre que o nível de exigência de infraestrutura de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica é muito diferente conforme o nível de potência ou demanda exigida. Sistemas que consomem energia rapidamente normalmente exigem fiações maiores nas redes elétricas, transformadores com dimensionamento maior, voltagem maior com maior exigência de isolamento elétrica, além da capacidade maior de potência das usinas geradoras. Assim, o custo para fornecer energia ao consumidor varia conforme a capacidade de o sistema elétrico conseguir fornecer a energia necessária nos momentos de pico de consumo, situação limite onde todo o equilíbrio do sistema elétrico é exigido e posto à prova.

No Brasil, o chamado custo de disponibilidade, atualmente regulado pela Resolução n. 1000/2021²⁷¹ da Aneel em seu art. 291, determina uma taxa mínima a ser cobrada do consumidor com valores distintos conforme o padrão de conexão, sendo que quanto maior a demanda disponível ao consumidor, maior a taxa mínima, baseado na ideia de que a maior disponibilidade de infraestrutura para fornecer energia com potência ou demanda maior precisa ter o custo repassado ao consumidor. Assim, existem três padrões previstos para o consumidor comum, sendo eles: I - 30 kWh, se monofásico ou bifásico a 2 (dois) condutores; II - 50 kWh, se bifásico a 3 (três) condutores; ou III - 100 kWh, se trifásico.

O aumento que se observa na participação de energias renováveis na matriz de geração de energia, em especial a fotovoltaica, traz significativos avanços na questão da sustentabilidade, contudo tem um efeito colateral, que os níveis mais altos de imprevisibilidade e de incerteza nos sistemas elétricos resultam em maior demanda por flexibilidade nos sistemas. Assim, “o sistema precisa se adaptar aos novos padrões de geração e de consumo de eletricidade, com a finalidade de manter o equilíbrio entre oferta e demanda

²⁷¹ ANEEL. AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução Normativa n. 1.000, de 7 de dezembro de 2021**. Disponível em: <https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren20211000.pdf> Acesso em: 12 fev. 2022.

e assegurar a qualidade do serviço com custos adequados ao consumidor final”.²⁷² Na medida em que a flexibilidade é reduzida do lado da oferta, ela deve ser ampliada no lado da demanda. Nesse sentido, “programas que incentivam a flexibilidade do usuário de energia são necessários e representam um mercado importante com previsão de alto crescimento”.²⁷³

A ampliação significativa da geração distribuída no Brasil, inserindo mais intermitência no sistema elétrico especialmente pela geração fotovoltaica, já teve sua primeira regulação legal pela Lei Federal 14.300/2022 no seu art. 1º, IX. A referida lei trouxe a definição de fontes despacháveis, que basicamente consistem naquelas que permitem um controle mais preciso do momento da geração da energia, em razão da possibilidade de armazenamento na fonte de geração, normalmente com a utilização baterias para atender aos picos de consumo. Essa exigência de utilização de fontes despacháveis na minigeração distribuída (entre 75kW a 5MW) deve trazer mais capacidade de resposta da demanda do lado da geração, conforme essa infraestrutura começar a ser executada.

A valoração do prêmio é o ponto chave num programa de resposta da demanda para garantir a adesão dos consumidores, com benefícios ao sistema, evitando o uso das usinas mais caras. “Recompensas ou penalidades podem ser associadas como regra para equilibrar a demanda de energia com a produção a nível da rede”.²⁷⁴ Os tipos de resposta da demanda podem ser: a) baseada em preço, onde o valor da tarifa oscila conforme a disponibilidade da geração; e b) baseada em incentivos, onde há um controle direto sobre a carga pelo sistema, reduzindo o consumo nos momentos de baixa disponibilidade da geração.

A tecnologia *blockchain* pode viabilizar o controle das redes de energia por meio de contratos inteligentes, sinalizando ao sistema quando as transações devem ser iniciadas. “Isso se basearia em regras predefinidas, destinadas a garantir que os fluxos de energia e de armazenamento sejam controlados automaticamente, de modo a equilibrar a oferta e a demanda”.²⁷⁵ Nesse contexto da digitalização, as tecnologias de redes inteligentes,

²⁷² CASTRO, Nivalde de; LIMA, Antônio; PEREIRA, Guillermo. **Perspectivas da tecnologia blockchain no Setor Elétrico: Aplicações na Europa, na Austrália e nos Estados Unidos.** GESEL – Grupo de Estudos do Setor Elétrico (UFRJ). Artigo publicado pela Agência Canal Energia. Disponível em: <https://bit.ly/37uAMXy> Acesso em: 04 nov. 2019.

²⁷³ GRUNWALD, Vanessa Heidrich. **Aplicações da tecnologia Blockchain na comercialização de energia no Brasil, a Singularidade da Energia, e um possível Ambiente de Contratação Distribuída – ACD.** 2018. 60 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização) - Programa FGV Management, Curitiba, 2018. p. 50.

²⁷⁴ GRUNWALD, Vanessa Heidrich. **Aplicações da tecnologia Blockchain na comercialização de energia no Brasil, a Singularidade da Energia, e um possível Ambiente de Contratação Distribuída – ACD.** 2018. 60 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização) - Programa FGV Management, Curitiba, 2018. p. 52.

²⁷⁵ CASTRO, Nivalde de; LIMA, Antônio; PEREIRA, Guillermo. **Perspectivas da tecnologia blockchain no Setor Elétrico: Aplicações na Europa, na Austrália e nos Estados Unidos.** GESEL – Grupo de Estudos do Setor

inteligência artificial e sistemas de monitoramento de energia oferecem um controle cada vez maior, e o uso de um *token* nos moldes do *EW Chain* surge como uma alternativa que permite resolver a questão da coordenação das informações dos diferentes aparelhos, sistemas e instrumentos, além de prover segurança dos dados, devido à criptografia.²⁷⁶

Sabe-se que muitas aplicações promissoras para a tecnologia *blockchain* também podem ser identificadas nos campos emergentes de plataformas de Internet das Coisas (*Internet of Things* – IoT), como nas casas inteligentes. Nesse sentido, as *blockchains* facilitam as transações P2P digitais, e assim podem potencialmente habilitar a comunicação de máquina a máquina (M2M) e as trocas de dados entre dispositivos inteligentes. Muitos dispositivos inteligentes estão sendo conectados à internet, e no campo da energia elétrica, medidores inteligentes e equipamentos de tecnologias de informação e comunicação estão sendo cada vez mais adotados em sistemas de energia. Essa tendência combinada com o poder da automação e da análise de *big data* pode transformar potencialmente a cadeia de valor no setor elétrico. *Insights* úteis de dados podem melhorar o desempenho do sistema de energia e diagnósticos de ativos que podem levar à redução de custos.²⁷⁷

Para as concessionárias de energia elétrica, a digitalização oferece uma oportunidade de melhorar a eficiência da rede, dos processos de faturamento, da cadeia de suprimentos e permite ainda a exploração de novas fontes de renda através da inovação e de novos modelos de negócios. A utilização dos dados da digitalização pode levar à otimização dos serviços de agregação de demanda e de resposta da demanda, tais como as usinas de energia virtuais (*Virtual Power Plant* – VPP) e potencialmente aumentar a participação ativa do consumidor e a integração renovável.²⁷⁸

A digitalização pode reduzir os custos de gerenciamento da geração distribuída intermitente e renovável, de menor escala por meio da manutenção e controle remotos possibilitados pela integração inteligente de *hardware*, *software*, sensores, dados, algoritmos de análises e conectividade em nuvem. A visão da chamada rede inteligente verá aparelhos

Elétrico (UFRJ). Artigo publicado pela Agência Canal Energia. Disponível em: <https://bit.ly/37uAMXy> Acesso em: 04 nov. 2019.

²⁷⁶ CASTRO, Nivalde de; LIMA, Antônio; PEREIRA, Guillermo. **Perspectivas da tecnologia blockchain no Setor Elétrico: Aplicações na Europa, na Austrália e nos Estados Unidos.** GESEL – Grupo de Estudos do Setor Elétrico (UFRJ). Artigo publicado pela Agência Canal Energia. Disponível em: <https://bit.ly/37uAMXy> Acesso em: 04 nov. 2019.

²⁷⁷ ANDONI, Merlinda *et al.* Blockchain technology in the energy sector: A systematic review of challenges and opportunities. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 100, Feb. 2019, pp. 143-174. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032118307184?via%3Dihub> Acesso em: 28 mar. 2022.

²⁷⁸ ANDONI, Merlinda *et al.* Blockchain technology in the energy sector: A systematic review of challenges and opportunities. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 100, Feb. 2019, pp. 143-174. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032118307184?via%3Dihub> Acesso em: 28 mar. 2022.

inteligentes, controle automatizado de unidades de aquecimento, ventilação e ar condicionado, veículos elétricos e o surgimento de prosumidores autogeradores. A visão da rede inteligente afirma que os dispositivos inteligentes interconectados serão capazes de coordenar e reagir aos sinais de preço, disponibilidade renovável ou estabilidade da rede, ajustando adequadamente seu consumo de energia elétrica.²⁷⁹

As abordagens centralizadas tradicionais tornam-se ineficientes quando dimensionadas para um grande número de dispositivos que produzem grandes volumes de dados em alta frequência. A tomada de decisão local e o controle distribuído podem reduzir a necessidade de recursos computacionais necessários para operar de forma otimizada os futuros sistemas de energia. Os aplicativos desenvolvidos utilizando *blockchain* podem facilitar as plataformas de IoT, enquanto as plataformas *blockchain* de código aberto, compartilhadas e colaborativas podem garantir a interoperabilidade em aplicativos de IoT.²⁸⁰

Um exemplo baseado em um exercício de uma plataforma de IoT habilitada para *blockchain* é apresentado por Mattila *et al.*, que visualizam um mercado autônomo local de uma sociedade habitacional, tal como um condomínio fechado, com placas fotovoltaicas no telhado, aparelhos inteligentes e flexíveis ligados na rede elétrica, veículos elétricos e um sistema de energia de bateria e medidores inteligentes que podem medir fluxos de eletricidade bidirecionais.²⁸¹

A tecnologia *blockchain* pode diferenciar os registros da eletricidade produzida por cada dispositivo, permitindo o comércio de eletricidade diretamente entre as diferentes máquinas. Com base nas preferências do usuário e na disposição de pagar os valores envolvidos, os agentes de negociação autônomos que formam parte integrante de todos os dispositivos inteligentes podem decidir estratégias de licitação ideais para negociar a energia por meio da plataforma. Esses dispositivos podem ser programados para operar de forma que

²⁷⁹ ANDONI, Merlinda *et al.* Blockchain technology in the energy sector: A systematic review of challenges and opportunities. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 100, Feb. 2019, pp. 143-174. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032118307184?via%3Dihub> Acesso em: 28 mar. 2022.

²⁸⁰ ANDONI, Merlinda *et al.* Blockchain technology in the energy sector: A systematic review of challenges and opportunities. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 100, Feb. 2019, pp. 143-174. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032118307184?via%3Dihub> Acesso em: 28 mar. 2022.

²⁸¹ MATTILA, Juri *et al.* **Industrial blockchain platforms: an exercise in use case development in the energy industry.** Disponível em: <https://www.econstor.eu/bitstream/10419/201258/1/ETLA-Working-Papers-43.pdf> Acesso em: 31 mar. 2022.

os objetivos desejados possam ser alcançados, e podem variar aumentando a autossuficiência energética ou minimizando a compra de energia da rede principal.²⁸²

Os lances e ofertas feitos por cada dispositivo seriam registrados em livros confiáveis e invioláveis. Os autores argumentam que as *blockchains* privadas que restringem o acesso aos moradores da sociedade habitacional seriam os mais adequados para essa aplicação. A rede principal da distribuidora de energia também pode participar do mercado, por exemplo, oferecendo seus preços à vista. Dispositivos inteligentes precisam combinar dados do mercado de geração distribuída com os fluxos de eletricidade comercializados. Eles também precisam ter a capacidade de se conectar uns aos outros. Esses dispositivos de IoT precisariam também ter alguma capacidade computacional, tal como um *Raspberry Pi* de baixo custo, um sistema operacional baseado em *Linux* e capacidade de armazenamento de dados para armazenar localmente o livro-razão.²⁸³

A resposta da demanda é uma área promissora para a aplicação de *blockchains*, mas há vários desafios consideráveis que precisam ser superados. Primeiramente é necessário o desenvolvimento de eletrônica de potência habilitada para *blockchain* que seja capaz de medir a demanda de cada dispositivo (ar condicionado, geladeira, máquina de lavar, veículos elétricos, etc.) e interagir com o sistema *blockchain* com baixa latência na resposta. Secundariamente, pode haver uma resistência do consumidor na utilização devido a preocupações de privacidade, já que não está claro se um consumidor gostaria que seu consumo de, por exemplo, chuveiro elétrico, máquina de lavar ou veículo elétrico fosse registrado publicamente em um livro-razão público. Portanto, a maneira como as informações são registradas no livro-razão, como preservar a privacidade e o anonimato de consumidores domésticos e industriais individuais, pode ser uma questão fundamental nas implementações de *blockchain* de sistemas IoT.²⁸⁴

Nesse sentido, Pop *et al.* explicam que a adoção de programas de resposta da demanda ainda está atrasada mundialmente devido à falta de conscientização dos prosumidores e ao medo de perder o controle e a privacidade dos dados de energia. No entanto, embora em geral

²⁸² ANDONI, Merlinda *et al.* Blockchain technology in the energy sector: A systematic review of challenges and opportunities. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 100, Feb. 2019, pp. 143-174. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032118307184?via%3Dihub> Acesso em: 28 mar. 2022.

²⁸³ ANDONI, Merlinda *et al.* Blockchain technology in the energy sector: A systematic review of challenges and opportunities. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 100, Feb. 2019, pp. 143-174. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032118307184?via%3Dihub> Acesso em: 28 mar. 2022.

²⁸⁴ ANDONI, Merlinda *et al.* Blockchain technology in the energy sector: A systematic review of challenges and opportunities. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 100, Feb. 2019, pp. 143-174. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032118307184?via%3Dihub> Acesso em: 28 mar. 2022.

a transparência da *blockchain* pública seja uma característica desejável no campo de energia elétrica, os dados de energia do prossumidor são sensíveis e privados, portanto, é necessária uma solução de preservação da privacidade.²⁸⁵

Para resolver essa situação, Pop *et al.* apresentam uma implementação descentralizada de programas de resposta da demanda desenvolvida utilizando uma *blockchain* pública, que trata da privacidade dos dados de energia do prossumidor usando provas de conhecimento zero e validando na *blockchain* a atividade do prossumidor. Dessa forma, os dados de energia do prossumidor são mantidos em sigilo, enquanto na *blockchain* é armazenada uma prova de conhecimento zero²⁸⁶ que é gerada pelo próprio prossumidor, permitindo assim a implementação de funções para validar possíveis desvios da solicitação e liquidar a atividade transacional do prossumidor.²⁸⁷

A criptografia se preocupa principalmente com comunicações seguras e inclui ocultar informações de adversários e autenticação de indivíduos. Numa explicação básica, uma prova de conhecimento zero é uma técnica de criptografia pelo qual uma parte (o provador) pode provar à outra parte (o verificador) que uma determinada afirmação é verdadeira, sem transmitir qualquer informação além do fato de que a afirmação é realmente verdadeira. Assim, as provas de conhecimento zero são técnicas de criptografia usadas para provar que você sabe algo sem revelar o que é e de que forma você consegue descobrir. Por exemplo, você pode mostrar sem dúvida que sabe a resposta de um quebra-cabeça sem realmente revelar a solução. Imagine dois copos com líquido incolor, um deles contém água e o outro veneno e você não tem como diferenciar um do outro. Se um terceiro (o provador) lhe demonstrar que consegue identificar qual copo contém água ou veneno através de repetidas experiências e acertar todas elas, num nível que a probabilidade seja incontestável, seria possível confiar no provador, sem saber a técnica que ele utiliza para realizar a identificação do conteúdo de cada copo.²⁸⁸

²⁸⁵ POP, Claudia D.; ANTAL, Marcel; CIOARA, Tudor; ANGHEL, Ionut; SALOMIE, Ioan. “Blockchain and Demand Response: zero-knowledge proofs for energy transactions privacy”. *Sensors*, v. 20, n. 19: 5678. 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/s20195678>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/20/19/5678/htm> Acesso em: 29 mar. 2022.

²⁸⁶ EXPRESSVPN. **Zero-knowledge proofs explained (Part 1)**. Disponível em: <https://www.expressvpn.com/blog/zero-knowledge-proofs-explained/> Acesso em: 01 abr. 2022.

²⁸⁷ POP, Claudia D.; ANTAL, Marcel; CIOARA, Tudor; ANGHEL, Ionut; SALOMIE, Ioan. “Blockchain and Demand Response: zero-knowledge proofs for energy transactions privacy”. *Sensors*, v. 20, n. 19: 5678. 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/s20195678>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/20/19/5678/htm> Acesso em: 29 mar. 2022.

²⁸⁸ EXPRESSVPN. **Zero-knowledge proofs explained (Part 1)**. Disponível em: <https://www.expressvpn.com/blog/zero-knowledge-proofs-explained/> Acesso em: 01 abr. 2022.

Assim, Pop *et al.* apresentam resultados promissores de uma técnica para garantir a privacidade dos dados de energia do prosumidor armazenados na *blockchain* pública e detectar possíveis inconsistências de dados. Na *blockchain* é armazenada uma prova de conhecimento zero que é gerada pelo próprio prosumidor, permitindo a implementação de funções para validar possíveis desvios da solicitação e liquidar a atividade do prosumidor.²⁸⁹

Outras técnicas utilizando *blockchain* estão sendo desenvolvidas como estímulo aos prosumidores utilizarem a resposta da demanda, normalmente com incentivos financeiros. Uma dessas técnicas propõe a utilização dos veículos elétricos ligados à rede elétrica da unidade consumidora, de forma que fora dos momentos de pico o veículo esteja carregando sua bateria, que por padrão possui boa capacidade de armazenamento, e nos momentos de pico de consumo, o veículo forneça energia armazenada em sua bateria para a unidade consumidora, de forma a aliviar a sobrecarga do sistema elétrico nessas situações.²⁹⁰

Como exposto, várias técnicas utilizando *blockchain* estão sendo desenvolvidas para atender a situações de resposta da demanda. A compreensão de que atualmente a melhor forma de lidar com recursos energéticos distribuídos é através de sistemas descentralizados e distribuídos de armazenamento da informação digitalizada, e que através de algoritmos e sistemas de criptografia e segurança de dados, consegue-se alcançar a escalabilidade, capacidade de processamento para o alto volume de transações e segurança da informação necessárias, podendo levar o setor elétrico a viabilizar grandes investimentos em novos produtos e serviços, promovendo em especial o desenvolvimento sustentável.

5.4 COMERCIALIZAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

5.4.1 Microrredes e transações ponto a ponto (P2P) de energia elétrica

A comercialização de energia ponto a ponto ou *peer-to-peer* (P2P) é o foco de muitas empresas e projetos para uso da *blockchain* para o setor de energia. O termo se refere a possibilidade de comprar e vender energia diretamente entre vizinhos. Os prosumidores com

²⁸⁹ POP, Claudia D.; ANTAL, Marcel; CIOARA, Tudor; ANGHEL, Ionut; SALOMIE, Ioan. “Blockchain and Demand Response: zero-knowledge proofs for energy transactions privacy”. *Sensors*, v. 20, n. 19: 5678. 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/s20195678>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/20/19/5678/htm> Acesso em: 29 mar. 2022.

²⁹⁰ SAMADI, Mikhak *et al.* **Energy Blockchain for Demand Response and Distributed Energy Resource Management**. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9632326/authors#authors> Acesso em: 01 abr. 2022.

excesso de energia podem vender seu excedente localmente ou exportar para a rede ou armazenamento. A grande quantidade existente dos REDs não é suportada pela atual estrutura da Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE), que é a responsável por viabilizar e gerenciar a comercialização de energia elétrica no Brasil. A maior parte da geração residencial é de origem fotovoltaica e seus excedentes geram margens pequenas nessas transações, o que torna esse mercado pouco atraente e provavelmente inviável para as comercializadoras, abrindo espaço para a tecnologia *blockchain*.²⁹¹

Espera-se que projetos de energia e microrredes locais e comunitárias desempenhem um papel cada vez mais importante nos sistemas de energia, pois têm um grande potencial para proporcionar benefícios socioeconômicos e ambientais para as comunidades envolvidas. Nas microrredes ou *microgrids*, geradores distribuídos, dispositivos de armazenamento, cargas incontroláveis e controláveis formam um sistema interligado que pode operar em sincronia com a rede principal ou em total autonomia no chamado modo ilha.²⁹²

Uma microrrede em modo ilha pode ser entendida como uma rede local de distribuição e consumo de energia elétrica que pode operar autônoma e isoladamente do sistema de distribuição da concessionária de maneira a manter o fornecimento de energia local. Podemos exemplificar uma microrrede na situação de um condomínio fechado horizontal, em uma área delimitada ou cercada, com lotes internos onde há casas edificadas e uma rede elétrica que interliga e abastece todas as residências, mas com um único medidor de energia da distribuidora de energia na entrada no condomínio, e internamente as residências possuem outros medidores para auferir o consumo proporcional de cada uma, administrado pelo condomínio.

Normalmente a rede interna desses condomínios pertence à própria distribuidora de energia elétrica, e as residências são unidades consumidoras autônomas. Mas no caso do exemplo anterior, as residências têm medidores de energia administrados pelo condomínio, que irá calcular a proporção do consumo de cada uma delas, para distribuir os custos de energia elétrica. Num arranjo desses, logo após o medidor da entrada de energia da distribuidora, é possível se instalar recursos energéticos distribuídos, como por exemplo

²⁹¹ GRUNWALD, Vanessa Heidrich. **Aplicações da tecnologia Blockchain na comercialização de energia no Brasil, a Singularidade da Energia, e um possível Ambiente de Contratação Distribuída – ACD**. 2018. 60 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização) - Programa FGV Management, Curitiba, 2018. p. 55.

²⁹² ANDONI, Merlinda *et al.* Blockchain technology in the energy sector: A systematic review of challenges and opportunities. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 100, Feb. 2019, pp. 143-174. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032118307184?via%3Dihub> Acesso em: 28 mar. 2022.

painéis fotovoltaicos nos telhados das residências, bancos de baterias, geradores a diesel ou gasolina, geradores eólicos, entre outros, de forma que toda essa infraestrutura pudesse gerar parcial ou totalmente a energia elétrica necessária para o consumo das residências existentes.

No caso de não haver energia elétrica gerada internamente para o abastecimento das residências, a energia complementar será fornecida pela conexão do condomínio junto à distribuidora de energia, que basicamente consiste na forma tradicional de geração distribuída regulada anteriormente pela Resolução Normativa n. 482/2012 e atualmente pela Resolução Normativa nº 1000/2021, ambas da ANEEL.²⁹³ Caso os recursos energéticos distribuídos internamente ao condomínio tenham capacidade de atender toda a carga de consumo das residências, é possível a microrrede operar em “modo ilha”, sendo que nesse caso ocorre um desacoplamento automático da conexão do condomínio junto à distribuidora de energia, funcionando a rede interna do condomínio isoladamente da rede externa de distribuição, apenas com a energia produzida ou armazenada nos recursos energéticos internos.

Mesmo que o condomínio em questão possua condições de operar em modo ilha, normalmente será economicamente mais interessante funcionar nos moldes da geração distribuída de maneira a se comportar como se todo o condomínio funcionasse como uma única unidade consumidora, e nos momentos em que houvesse excedente de produção de energia elétrica, que ela fosse injetada na rede de distribuição e os créditos de energia gerados fossem contabilizados em favor do condomínio, para posterior compensação, estaria trazendo benefício econômico desse excedente.

Nas situações de falha ou suspensão temporária do abastecimento de energia pelas distribuidoras, as unidades que usam a geração distribuída convencional não podem injetar energia na rede elétrica e a energia da unidade consumidora é desligada, mesmo que ela possua geração própria suficiente para o seu abastecimento, pois ela continua acoplada à rede de distribuição. Contudo, a possibilidade de operar em modo ilha permite uma grande vantagem ao condomínio no caso de falhas no fornecimento de energia elétrica pela distribuidora, pois ele pode se desacoplar da rede da distribuidora e funcionar isoladamente, com os recursos próprios, mantendo assim o abastecimento de energia elétrica internamente ao condomínio.

²⁹³ ANEEL. AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução Normativa n. 1.000, de 7 de dezembro de 2021**. Disponível em: <https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren20211000.pdf> Acesso em: 12 fev. 2022.

Essa compreensão é importante para entender o motivo pelo qual a utilização de uma infraestrutura de medidores inteligentes nas residências e nos demais REDs existentes internamente, em conjunto com um sistema baseado em *blockchain* para realizar a liquidação instantânea entre geração e consumo, pode permitir que os moradores comercializem energia elétrica entre si diretamente. Dessa forma, aqueles moradores que conseguirem gerar mais energia, por terem investido mais em placas fotovoltaicas ou outras formas de geração, injetam mais energia no sistema, que será consumida por outros moradores que não possuam GD ou a tenham em quantidade insuficiente para seu consumo, e essa transação será percebida pelos medidores inteligentes e contabilizada e feita a liquidação da transação pelo sistema *blockchain*, gerando um crédito para o fornecedor de energia e um débito para o consumidor. Em breve síntese, esse é o funcionamento do comércio P2P de energia.

Assim, na perspectiva de controle, as microrredes atuam como um único sistema que possui limites elétricos distintos em relação à rede principal. Além do modelo tradicional de microrrede, também podem ser consideradas as microrredes virtuais que podem fornecer controle agregado de oferta e demanda fora dos limites elétricos e físicos. As microrredes promovem a produção e o consumo de energia localizados, o que pode levar a uma redução significativa das perdas de distribuição e transmissão. Quando combinadas com recursos sustentáveis, as microrredes podem melhorar ainda mais a integração das FER. As microrredes locais podem melhorar a resiliência da rede, fornecer serviços ancilares, como suporte de frequência e tensão para sistemas de energia antigos, com potencial para adiar investimentos caros em atualização de rede. Além disso, podem fornecer serviços de energia aos consumidores no caso de contingências na rede.²⁹⁴

No caso de P2P, o proprietário da microgeração ou minigeração distribuída poderia vender seu excedente de forma livre todos os meses, criando um incentivo real para instalações acima da carga de consumo local, e todo o sistema se beneficiaria com preços de energia mais baixos e menor necessidade de expansão do sistema de transmissão e mesmo de distribuição.²⁹⁵ A tecnologia *blockchain* constituiria uma plataforma para a realização de transações de compra e venda de energia. O objetivo destas trocas seria balancear a oferta e a demanda, em tempo real, de forma autônoma e descentralizada. Para isso ocorrer, contudo,

²⁹⁴ ANDONI, Merlinda *et al.* Blockchain technology in the energy sector: A systematic review of challenges and opportunities. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 100, Feb. 2019, pp. 143-174. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032118307184?via%3Dihub> Acesso em: 28 mar. 2022.

²⁹⁵ GRUNWALD, Vanessa Heidrich. **Aplicações da tecnologia Blockchain na comercialização de energia no Brasil, a Singularidade da Energia, e um possível Ambiente de Contratação Distribuída – ACD**. 2018. 60 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização) - Programa FGV Management, Curitiba, 2018. p. 56.

são necessários alguns requisitos básicos, como, obrigatoriamente, um medidor inteligente e, preferivelmente, um sistema de baterias para armazenamento e redução da intermitência.²⁹⁶

Assim, internamente os vizinhos do condomínio do exemplo acima poderiam usar um sistema de geração distribuída, utilizando medidores inteligentes e um sistema de créditos *tokenizados*, gerenciado por uma plataforma *blockchain* que faz a contabilização e a liquidação dos créditos de energia, permitindo e estimulando o investimento em geração de energia distribuída e renovável acima dos valores de seu consumo, já que auferirá um retorno financeiro sobre o investimento realizado.

O funcionamento dessa plataforma teria a princípio as seguintes etapas: a) o prosumidor gera um excedente de energia; b) esta energia é exportada para a rede e registrada em um medidor inteligente antes de ser registrada na *blockchain*; c) a energia exportada é representada por um *token* (por exemplo, 1 *token* = 1 kWh); d) os *tokens* podem ser registrados no ambiente interno do *microgrid* ou no mercado aberto (ACD) para que os consumidores possam adquiri-los; e) os consumidores têm acesso a uma lista com as vendas que estão ocorrendo, com o tipo de geração que foi realizada e a localização precisa.²⁹⁷

Utilizando a *blockchain*, seria possível saber quanto um usuário poderia contribuir em termos de energia, pelo seu histórico de geração e consumo e suas flutuações estatísticas, em kWh. “O *blockchain* seria, portanto, um mecanismo de definição das preferências de consumo e de geração dos prosumidores, operacionalizando regras preestabelecidas, por meio de contratos inteligentes, em função da variação de preço, de hora, de fluxo e de estoque de energia”.²⁹⁸

Por esses motivos, a *blockchain* permite a *tokenização* das informações da energia elétrica, viabilizando que ela seja negociada diretamente entre as pessoas, sem a necessidade de uma entidade controladora das operações, e permite também uma liquidação contábil quase instantânea entre os prosumidores, de forma a reduzir os custos de transação e estimular o investimento em energia sustentável e a estabilidade do sistema elétrico.

²⁹⁶ CASTRO, Nivalde de; LIMA, Antônio; PEREIRA, Guillermo. **Perspectivas da tecnologia blockchain no Setor Elétrico:** Aplicações na Europa, na Austrália e nos Estados Unidos. GESEL – Grupo de Estudos do Setor Elétrico (UFRJ). Artigo publicado pela Agência Canal Energia. Disponível em: <https://bit.ly/37uAMXy> Acesso em: 04 nov. 2019.

²⁹⁷ CASTRO, Nivalde de; LIMA, Antônio; PEREIRA, Guillermo. **Perspectivas da tecnologia blockchain no Setor Elétrico:** Aplicações na Europa, na Austrália e nos Estados Unidos. GESEL – Grupo de Estudos do Setor Elétrico (UFRJ). Artigo publicado pela Agência Canal Energia. Disponível em: <https://bit.ly/37uAMXy> Acesso em: 04 nov. 2019.

²⁹⁸ CASTRO, Nivalde de; LIMA, Antônio; PEREIRA, Guillermo. **Perspectivas da tecnologia blockchain no Setor Elétrico:** Aplicações na Europa, na Austrália e nos Estados Unidos. GESEL – Grupo de Estudos do Setor Elétrico (UFRJ). Artigo publicado pela Agência Canal Energia. Disponível em: <https://bit.ly/37uAMXy> Acesso em: 04 nov. 2019.

5.4.2 Comercialização P2P de créditos de energia elétrica oriundos da GD

Nos mesmos moldes propostos para a utilização em microrredes, a utilização de medidores inteligentes nas unidades consumidoras pode ser utilizada para a criação de créditos *tokenizados* da geração distribuída. Atualmente no Brasil, esses créditos de energia previstos na Lei Federal n. 14.300/2022, art. 1º, XIV, através do denominado Sistema de Compensação de Energia Elétrica (SCEE)²⁹⁹ são cedidos a título de empréstimo gratuito para a distribuidora local e posteriormente compensados com o consumo de energia elétrica ativa ou contabilizados como crédito de energia de unidades consumidoras participantes do sistema.

Todo o controle desses créditos é atualmente gerenciado e operado pelas distribuidoras de energia elétrica, que através de um sistema centralizado de armazenamento e registros dessas informações, mantém um banco de dados com todas as informações da quantidade de créditos a compensar de cada unidade consumidora e do seu titular. Essa situação por si só já cria um conflito de interesses e riscos para os detentores desses créditos, já que uma eventual falha no sistema centralizado de registro desses créditos, ocasionaria uma perda de dados desses créditos, o que poderia levar a grandes prejuízos financeiros. Além da incômoda situação em que a detentora das informações e registro dos créditos do SCEE é a mesma entidade que realizará a compensação financeira dos mesmos, trazendo claros conflitos de interesses na guarda de informações de valores que tendem a ser cada vez mais expressivos, conforme a GD continue a se expandir.

Outro ponto de risco a ser considerado é o sistema tradicional de medição manual, realizado pelas distribuidoras de energia dos valores constantes nos medidores de energia, que poderia trazer imprecisão. Isso novamente motivaria o conflito de interesses ao se estabelecer os procedimentos operacionais para a leitura manual dos valores constantes nos medidores, já que o incentivo financeiro da distribuidora determina que a imprecisão na medição venha em desfavor do detentor dos créditos da unidade consumidora, e não em seu próprio desfavor.

²⁹⁹ BRASIL. CÂMARA DOS DEPUTADOS. **Lei n. 14.300, de 6 de janeiro de 2022**: Marco Legal da Microgeração e Minigeração Distribuída. Disponível em: <https://www2.camara.leg.br/legin/fed/lei/2022/lei-14300-6-janeiro-2022-792217-norma-pl.html> Acesso em: 20 jan. 2022.

Art. 1º: Para fins e efeitos desta Lei, são adotadas as seguintes definições: [...] XIV - Sistema de Compensação de Energia Elétrica (SCEE): sistema no qual a energia ativa é injetada por unidade consumidora com microgeração ou minigeração distribuída na rede da distribuidora local, cedida a título de empréstimo gratuito e posteriormente compensada com o consumo de energia elétrica ativa ou contabilizada como crédito de energia de unidades consumidoras participantes do sistema.

A utilização de medidores inteligentes ligados numa rede *blockchain* para criar créditos de energia do SCEE, de forma que a criação de cada crédito correspondesse a um *token* que fosse automaticamente creditado na conta do titular daquela unidade consumidora, criaria uma estrutura que possibilitaria que o banco de dados do SCEE fosse muito mais confiável e resiliente à perda de dados ou adulterações nos registros.

A mesma rede *blockchain* que fará o registro dos créditos do SCEE poderá ter uma plataforma integrada de negociação, ou até mesmo valer-se de corretoras externas para a comercialização dos créditos, que podem ser posteriormente repassados para a distribuidora de energia para a compensação dos créditos.

Essa possibilidade de comercialização dos créditos do SCEE inclusive já foi previsto na Lei Federal n. 14.300/2022, art. 24, que determinou que a concessionária ou permissionária de energia elétrica promova chamadas públicas para o credenciamento de interessados em comercializar os excedentes de geração de energia oriundos de projetos de microgeradores e minigeradores distribuídos, nas suas áreas de concessão, para posterior compra desses excedentes de energia, na forma de regulamentação da Aneel.³⁰⁰

Como já observado, essa será uma das mais importantes regulamentações que a Aneel deverá realizar, pois possibilita a criação de um enorme mercado de comercialização de energia, quase totalmente baseado em energia renovável, criando espaço para uma convergência de interesses ambientais, empresariais, comerciais e de desenvolvimento econômico e social.

No Brasil seria possível chamar esse mercado de Ambiente de Contratação Distribuída (ACD), em analogia aos atuais Ambiente de Contratação Regulada (ACR), e Ambiente de Contratação Livre (ACL), uma vez que tanto consumidores regulados quanto consumidores livres poderiam engajar-se como prossumidores e se beneficiar de um mercado distribuído.

A *tokenização* proposta para os créditos do SCEE pode propiciar uma grande oportunidade para o empreendedorismo e a geração de novos negócios ligados ao setor de energia, possibilitando que tanto empresas como particulares possam investir em geração distribuída, gerando uma rápida ampliação do sistema elétrico brasileiro, ainda mais resiliente

³⁰⁰ BRASIL. CÂMARA DOS DEPUTADOS. **Lei n. 14.300, de 6 de janeiro de 2022:** Marco Legal da Microgeração e Minigeração Distribuída. Disponível em: <https://www2.camara.leg.br/legin/fed/lei/2022/lei-14300-6-janeiro-2022-792217-norma-pl.html> Acesso em: 20 jan. 2022.

Art. 24: A concessionária ou permissionária de distribuição de energia elétrica deverá promover chamadas públicas para credenciamento de interessados em comercializar os excedentes de geração de energia oriundos de projetos de microgeradores e minigeradores distribuídos, nas suas áreas de concessão, para posterior compra desses excedentes de energia, na forma de regulamentação da Aneel.

e ambientalmente sustentável, trazendo todos os benefícios econômicos e sociais decorrentes da correlação existente entre o aumento do PIB dos países e o consumo/fornecimento de energia elétrica.

A implementação física desse sistema demandaria a utilização de medidores inteligentes por parte das distribuidoras, interligados a redes de dados, para realizar a medição e criação do *token* do crédito de energia do SCEE, que automaticamente será creditado e contabilizado na conta do titular da unidade consumidora.

A própria distribuidora poderia oferecer uma plataforma de negociação dos *tokens* para os seus usuários, o que seria mais uma forma de rentabilizar esse serviço, agregando valor a esses créditos, que na medida em que podem ser comercializados e não apenas abatidos do próprio consumo, traz uma ampla gama de possibilidade de serviços e operações de crédito sobre o valor que esses créditos representam. Assim, esses créditos do SCEE poderiam ser oferecidos em garantia, ser vendidos ou comprados conforme o valor da energia no momento do consumo, e inclusive, conforme critérios regulamentares a serem eventualmente criados, possibilitar a emissão dos mesmos pela distribuidora de energia para levar recursos para a expansão da própria infraestrutura do sistema elétrico.

Os bens e direitos que possuem alto grau de liquidez e utilidade costumam ter ótimo valor de negociação, como poderia ser o caso dos créditos de energia do SCEE, que terão utilidade imediata para abater no consumo de energia elétrica, ou utilizado como ativo de valor para negociação por outros ativos *tokenizados* ou negociados em corretoras de valores. Isso tende a levar a grandes investimentos em infraestrutura de GD, trazendo recursos para investimento em energia elétrica, o que contribuiria para a modicidade dos preços da energia, para o desenvolvimento de um mercado de tecnologia relacionado a serviços do setor elétrico e em última análise, para o desenvolvimento do país.

A utilização da tecnologia *blockchain* para registro da quantidade de *tokens* e transações com liquidação automatizada, tem contribuído para o sucesso das criptomoedas e está se avaliando se o uso da tecnologia *blockchain* poderia ir além de suas funções atuais, de forma a criar uma nova estrutura de custódia, liquidação e garantias para as operações financeiras, especialmente para os mercados futuros.³⁰¹

³⁰¹ BEVILACQUA, Rafael. **O blockchain pode substituir as clearings?** [mensagem pessoal] Mensagem recebida em: arleijunior@gmail.com Data de recebimento: 08 abr. 2022.

Bevilacqua explica que os mercados à vista de ações, *commodities*, títulos de renda fixa públicos e privados e moedas funcionam como na feira, comprou, pagou. Há riscos de fraude, mas esse risco não é sistêmico e atinge apenas as partes envolvidas no negócio. Já os mercados de derivativos (contratos futuros, opções e mesmo contratos a termo) são fundamentalmente diferentes, pois ao comprar um contrato futuro de juros ou de índice, o investidor não está pagando por um ativo em si, mas por um compromisso, assumido pela outra parte, que aquele ativo será entregue em um determinado momento por um preço específico, ou seu valor em dinheiro. Como o mercado futuro é baseado em promessas que devem ser cumpridas, há o risco de esses compromissos não serem honrados. Para evitar isso, as bolsas de derivativos estabeleceram estruturas para garantir o cumprimento desses contratos. São as *clearings*, ou câmaras de compensação, e para participar desse mercado, os investidores têm de depositar garantias nessas *clearings*.³⁰²

O que está sendo avaliado pelos responsáveis por corretoras de criptomoedas é a possibilidade de substituir essa estrutura mais lenta e onerosa pela *blockchain* em si. Dessa forma, em vez de deixar a garantia da liquidação nas mãos das *clearings*, os derivativos de criptomoedas estariam garantidos pelos próprios participantes em tempo real, em vez de esperar o fechamento dos pregões e posteriormente as liquidações durante a noite, como ocorre atualmente. O novo sistema em *blockchain* poderia realizar esses ajustes minuto a minuto, ou mesmo em questão de segundos, pensando nas transações de alta frequência. Com isso as liquidações seriam muito mais frequentes, mas as crises seriam menos devastadoras. E, à medida que “as estruturas operando 24 horas na rede *blockchain* permitem negócios rápidos, o próprio conceito de deixar muito dinheiro depositado em algum lugar para servir de garantia se necessário pode tornar-se obsoleto. O impacto seria enorme, tanto na descentralização dos mercados quanto na liberação de capital para os investidores”.³⁰³

A utilização das *blockchains* para a comercialização dos créditos do SCEE podem incentivar a participação do consumidor final de forma que o custo real da energia seja exposto, o que pode resultar em consumo de energia mais racional ou sinais de preços adequados para resposta da demanda. Até o momento os prosumidores não tiveram acesso real ao mercado de comercialização de energia, que continua a ser um privilégio para os fornecedores de energia institucionalizados.

³⁰² BEVILACQUA, Rafael. **O blockchain pode substituir as clearings?** [mensagem pessoal] Mensagem recebida em: arleijunior@gmail.com Data de recebimento: 08 abr. 2022.

³⁰³ BEVILACQUA, Rafael. **O blockchain pode substituir as clearings?** [mensagem pessoal] Mensagem recebida em: arleijunior@gmail.com Data de recebimento: 08 abr. 2022.

Como forma de incentivo para mais investimento em FER, alguns países utilizam as chamadas tarifas de alimentação (*Feed-in Tariffs* ou *FiTs*)³⁰⁴ para vender o excedente de energia da geração distribuída de volta à rede, mas geralmente têm valores inadequados ou então estes incentivos estão sendo removidos. O usual são as concessionárias comprarem esse excedente a preços baixos e o venderem de volta a outros consumidores a preços tarifários padrão. Se os prossumidores puderem vender seu excedente diretamente a outros consumidores sem intermediários, surge um potencial de economia de custos de energia para todas as partes interessadas, em favor da modicidade tarifária.³⁰⁵

Os consumidores que não podem investir em geração distribuída usando energia renovável, seja por recursos financeiros ou limitação de espaço para instalação, podem comprar energia renovável certificada a preços acessíveis. Muitas vezes os consumidores estão dispostos a pagar um prêmio pela compra de energia renovável, no entanto, atualmente não há garantia sobre a origem da energia comprada. A utilização da *blockchain* permite total transparência sobre as origens da energia comprada, como o seu tipo, a unidade geradora e localização exata produzida, bastando estas informações estarem contempladas no projeto do banco de dados e serão inseridas automaticamente pelos medidores inteligentes.³⁰⁶

Nesse contexto é muito importante o papel das distribuidoras de energia elétrica, pois são elas que possuem a infraestrutura física das redes elétricas e são responsáveis pela estabilidade do sistema. Quando começar a comercialização dos créditos de energia do SCEE, são as distribuidoras de energia que vão garantir que as transações descentralizadas de energia realizadas entre as partes possam realmente ocorrer, pois são elas que operam fisicamente o sistema elétrico, e precisam ter as informações de quem detêm os créditos para poder realizar a compensação. Assim, as distribuidoras de energia terão um papel fundamental em qualquer tipo de implementação de *blockchain*, que de imediato já traria alguns benefícios às distribuidoras, tais como a medição precisa e automática dos valores de cada unidade

³⁰⁴ ENERGOPEDIA. **Feed-in Tariffs (FIT)**. Disponível em: [https://energypedia.info/wiki/Feed-in_Tariffs_\(FIT\)#Brazil](https://energypedia.info/wiki/Feed-in_Tariffs_(FIT)#Brazil) Acesso em: 09 abr. 2022.

³⁰⁵ ANDONI, Merlinda *et al.* Blockchain technology in the energy sector: A systematic review of challenges and opportunities. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 100, Feb. 2019, pp. 143-174. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032118307184?via%3Dihub> Acesso em: 28 mar. 2022.

³⁰⁶ ANDONI, Merlinda *et al.* Blockchain technology in the energy sector: A systematic review of challenges and opportunities. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 100, Feb. 2019, pp. 143-174. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032118307184?via%3Dihub> Acesso em: 28 mar. 2022.

consumidora e a utilização das informações registradas nas *blockchains* para gerenciar melhor a capacidade e os fluxos de energia em sua rede.³⁰⁷

O contexto apresentado ilustra como a utilização de *tokens* criptográficos para a comercialização dos créditos do SCEE, prevista no art. 24 da Lei Federal n. 14.300/2022, pode contribuir de diversas formas para todos os envolvidos no processo, sejam as distribuidoras, as empresas que desenvolvem produtos para geração de energia renovável, os comerciantes e instaladores desses produtos e os prossumidores. Inclusive seria um ótimo incentivo para investimentos privados no setor de energia, economizando recursos públicos e maximizando as chances de se alcançar uma ampliação significativa no uso das FER no território brasileiro.

5.5 CERTIFICADOS DE ORIGEM DE ENERGIA ELÉTRICA

Na mesma rede elétrica, toda energia é igual, homogênea, sendo indistinguível a sua fonte de origem, a menos que se construa uma rede independente para cada espécie de geração de energia, o que é economicamente inviável devido ao enorme custo de infraestrutura. Isso é um problema porque a geração de energia tem um impacto ambiental, assim, a energia renovável tende a ser sustentável, limpa e com poucas ou nenhuma emissão de carbono durante a produção, em comparação com a eletricidade produzida a partir de usinas a carvão.³⁰⁸

Para identificar a origem da energia é necessário um certificado que declare sua proveniência, sua localização e que documente a quantidade de energia gerada e a data da sua produção, tornando-o heterogêneo. Esse certificado pode ser adquirido por livre iniciativa dos consumidores, por interesses comerciais ou ainda exigido por políticas públicas que busquem sustentabilidade. Exemplifica-se com as Garantias de Origem (GOs) utilizadas na União Europeia, os Créditos de Energia Renovável (RECs) nos EUA e no Brasil, e os Certificados de Energia Limpa (CEL) no México.

³⁰⁷ ANDONI, Merlinda *et al.* Blockchain technology in the energy sector: A systematic review of challenges and opportunities. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 100, Feb. 2019, pp. 143-174. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032118307184?via%3Dihub> Acesso em: 28 mar. 2022.

³⁰⁸ GRUNWALD, Vanessa Heidrich. **Aplicações da tecnologia Blockchain na comercialização de energia no Brasil, a Singularidade da Energia, e um possível Ambiente de Contratação Distribuída – ACD**. 2018. 60 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização) - Programa FGV Management, Curitiba, 2018. p. 43.

Nos Estados Unidos (REC) e na Europa (GO) o sistema de rastreamento é estatal, obrigatório para energia renovável e, em alguns países, também para energia fóssil e nuclear. Tanto a GO como o REC são padronizados: eles emitem eletronicamente um certificado para cada MWh produzido, que também pode incluir outras informações como o nome da usina, localização e data de produção. As GOs são válidas por no máximo um ano para fins de compensação, e após são canceladas no registro eletrônico de certificados. Por ser um documento único e padronizado, é possível rastrear sua propriedade e garantir que as GOs sejam vendidas apenas uma vez e que não haja contagem dupla. O valor da GO é dado pela oferta e demanda, variando no mercado.³⁰⁹ No México, o CEL foi introduzido via legislação em 2013, mas começou efetivamente em 2018 com uma imposição de 5% em relação ao consumo de energia no ano, que irá aumentando até alcançar 13,9% em 2022.

No Brasil, o mercado de certificação de energia renovável iniciou em 2014, e cresceu significativamente desde o seu lançamento, e em março de 2019 contava com 87 usinas aptas a emitir REC. Cada certificado “REC Brazil” equivale a um MWh de eletricidade produzida a partir de fontes renováveis, sendo que a maioria das instalações que geram certificados já possuem registro na plataforma internacional IREC, mundialmente reconhecida para registro, emissão e transferência de Certificados de Energia Renovável, permitindo aos consumidores rastrear seu consumo. A I-REC está disponível para a América Latina, Ásia e África, pois que Europa e Estados Unidos já possuem os sistemas GO e REC.³¹⁰

Os atuais sistemas de emissão e rastreamento de certificados possuem deficiências que abrem possibilidades para a tecnologia *blockchain*, sendo essencialmente três: a) centralização pelas instituições governamentais da emissão dos certificados, o que na transição para energias renováveis descentralizadas será complexo continuarem sendo esse intermediário confiável; b) custos administrativos e transacionais para verificar a origem da eletricidade nos REDs, que pela elevada quantidade existente e pela pequena geração de cada um deles, acabam não podendo participar desse mercado de certificados; c) automação e experiência do usuário, pela falta de processos padronizados e automatizados, tornando-o

³⁰⁹ GRUNWALD, Vanessa Heidrich. **Aplicações da tecnologia Blockchain na comercialização de energia no Brasil, a Singularidade da Energia, e um possível Ambiente de Contratação Distribuída – ACD**. 2018. 60 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização) - Programa FGV Management, Curitiba, 2018. p. 45.

³¹⁰ INSTITUTO TOTUM. **Certificação de energia renovável cresce acima das expectativas**. Disponível em: <https://www.institutototum.com.br/index.php/noticias/28-programa-de-certificacao-de-energia-renovavel/312-certificacao-de-energia-renovavel-cresce-acima-das-expectativas> Acesso em: 16 nov. 2019.

excessivamente burocrático, sendo necessária uma experiência de usuário melhor e mais moderna.³¹¹

Vários projetos buscam desenvolver tecnologias baseadas em *blockchain* para certificados de energia renovável ou créditos de carbono, com emissão e negociação automatizadas. As atuais estruturas de mercado para os certificados de energia renovável, créditos de carbono ou atributos ambientais gerais são fragmentadas e complexas. Os pequenos produtores de energia são, na prática, excluídos da reivindicação de créditos de carbono devido aos altos custos associados ao procedimento. Além disso, os processos de auditoria são muitas vezes executados manualmente por uma autoridade central, portanto, são propensos a erros e até fraudes. Os sistemas *blockchain* podem automatizar a emissão de certificados verdes (inclusive para baixos volumes de energia), reduzir custos de transação, além de criar um mercado global para esses ativos, aumentar a transparência no mercado e evitar gastos duplos.³¹²

A principal limitação para um sistema utilizando *blockchain* neste campo é a certificação e verificação dos serviços prestados. Por exemplo, medidores inteligentes integrados a soluções *blockchain* podem certificar automaticamente a produção de energia de uma pessoa ou empresa, no entanto, o potencial de adulteração de tais sistemas ainda não é explorado. Assim, é necessário que os medidores inteligentes utilizados tenham alta confiabilidade contra fraudes de medição da quantidade de energia produzida, bem como sistemas de *software* resilientes a fraudes.

Ainda são necessários processos de certificação sobre a tecnologia de geração de energia renovável, com a análise e auditoria por empresas especializadas, que declarem todas as características peculiares àquela unidade de geração de energia renovável. Em função desse processo de certificação, será possível instalar medidores inteligentes que contenham as informações parametrizadas adequadas, de forma a inserir no *token criptográfico* criado todas as informações fidedignas da energia gerada. Assim, será possível valorar cada *token criptográfico* pelas suas exatas peculiaridades, conforme as políticas públicas ambientais que se pretenda estimular.

³¹¹ GRUNWALD, Vanessa Heidrich. **Aplicações da tecnologia Blockchain na comercialização de energia no Brasil, a Singularidade da Energia, e um possível Ambiente de Contratação Distribuída – ACD**. 2018. 60 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização) - Programa FGV Management, Curitiba, 2018. p. 47.

³¹² ANDONI, Merlinda *et al.* Blockchain technology in the energy sector: A systematic review of challenges and opportunities. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 100, Feb. 2019, pp. 143-174. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032118307184?via%3Dihub> Acesso em: 28 mar. 2022.

Dentre os projetos em andamento, a Nasdaq foi a primeira bolsa de valores global a explorar tecnologias de contabilidade distribuída,³¹³ e realizou um projeto piloto de negociação de certificados verdes bem-sucedido em 2016. Os produtores solares receberam certificados com tecnologia desenvolvida pela Filament, que foram negociados *on-line* pela plataforma *Linq* da Nasdaq.

Nesse sentido, o estado do Rio de Janeiro assinou um protocolo de intenções com a Nasdaq para operar uma bolsa de créditos de carbono no Brasil. Segundo informado pelo governo do estado do Rio de Janeiro, a parceria prevê o intercâmbio de informações entre o estado, a Nasdaq e a GEAP para certificar, emitir e negociar créditos de carbono e ativos ambientais, como energia, clima e florestas.³¹⁴

A Veridium lançou uma plataforma baseada em *Ethereum* para negociar créditos de carbono e ativos de capital natural por meio de seu *token* TGR. Nesse sentido argumenta que embora a jornada de adoção da tecnologia *blockchain* no setor elétrico possa começar com mercados P2P comunitários, gerenciamento de energia doméstica e liquidação de cobrança de carga de veículos elétricos, ao longo do tempo deve-se ver as partes da cadeia de valor impactadas com a liquidação automática de transações da rede, avaliação de ativos em tempo real e produtos projetados utilizando a funcionalidade de contratos inteligentes. Isso levará a um novo arranjo institucional entre os atores envolvidos e o equilíbrio decorrente deve levar ao desenvolvimento de um mercado de carbono utilizando técnicas de registro distribuído possibilitada pela *blockchain*.³¹⁵

O *Energy Blockchain Lab*, uma iniciativa sobre aplicativos *blockchain* de energia, fez parceria com a IBM para criar uma plataforma de gerenciamento de crédito de carbono que visa reduzir os custos do mercado nacional de carbono da China em 30%. A *Energy Blockchain Labs* fornece serviços financeiros de *blockchain* para empresas com o objetivo de melhorar sua agenda de economia de energia e sustentabilidade. Em parceria com a IBM, eles desenvolveram uma plataforma que apresentam como eficiente e transparente, permitindo que organizações com alta emissão de carbono cumpram suas cotas comprando créditos de carbono de pequenos emissores desses créditos. A IBM e a *Energy Blockchain Labs* visam

³¹³ CASTILLO, Michael del. **Nasdaq explores how blockchain could fuel solar energy market**. Disponível em: <https://www.coindesk.com/nasdaq-blockchain-solar-power-market/> Acesso em: 29 mar. 2022.

³¹⁴ RIVAS, Katherine. **Rio assina protocolo de intenções com a Nasdaq para ter bolsa de créditos de carbono**. Disponível em: <https://www.infomoney.com.br/mercados/rio-vai-ter-nova-bolsa-em-parceria-com-nasdaq-para-negociar-creditos-de-carbono/> Acesso em: 31 mar. 2022.

³¹⁵ INDIGO ADVISORY GROUP. **Blockchain in energy and utilities**. Use cases, vendor activity, market analysis. Disponível em: <https://www.indigoadvisorygroup.com/blockchain> Acesso em: 29 mar. 2022.

reduzir o ciclo de vida médio de 10 meses dos ativos de carbono na China de 20% para 50%, o que pode levar a economias significativas nos custos operacionais dessas empresas.³¹⁶

Considerando que a China é responsável por aproximadamente um quarto das emissões mundiais de dióxido de carbono, esse aumento do uso de energia renovável é bem-vindo. Contudo, construir uma economia verde viável e reduzir as emissões não é tarefa fácil, principalmente porque o custo da energia renovável ainda é bem superior aos preços dos combustíveis fósseis, e pode ser reduzida otimizando as inadequações nos mecanismos de mercado daquele país.³¹⁷

A *Grid Singularity*³¹⁸ busca fornecer várias soluções de *blockchain* para o setor elétrico, incluindo a negociação de certificados verdes, e é um dos membros fundadores da *Energy Web Foundation* (EWF).³¹⁹ A EWF se apresenta como uma comunidade com o maior ecossistema de código aberto focado em tecnologia descentralizada e transição energética do mundo.

O uso da *blockchain* na certificação de energia é uma aplicação direta, e nesse sentido a EWF desenvolveu e está aprimorando uma plataforma digital chamada *Origin*,³²⁰ baseada no *Ethereum*, que visa simplificar e melhorar os mercados de certificados de origem para energias renováveis, com rastreamento do kWh e as compensações de carbono associadas para todas as regiões geográficas, em uma plataforma única, integrando os mercados de certificados, aumentando a granularidade e diminuindo o custo das transações.³²¹

A *Origin* oferece módulos personalizáveis e combinados para criar sistemas de rastreamento digital e mercados para certificados de eletricidade renovável. A EW implantou várias instâncias do *Origin* para diferentes parceiros em diferentes geografias, incluindo:³²²

³¹⁶ IBM. **Energy blockchain labs inc.** Disponível em: <https://www.ibm.com/case-studies/energy-blockchain-labs-inc> Acesso em: 29 mar. 2022.

³¹⁷ IBM. **Energy blockchain labs inc.** Disponível em: <https://www.ibm.com/case-studies/energy-blockchain-labs-inc> Acesso em: 29 mar. 2022.

³¹⁸ GRID SINGULARITY. **Grid Singularity website.** Disponível em: <http://gridsingularity.com/#/> Acesso em: 29 mar. 2022.

³¹⁹ ENERGY WEB FOUNDATION. **Energy Web Stack.** Disponível em: <https://www.energyweb.org/tech/> Acesso em: 29 mar. 2022.

³²⁰ ENERGY WEB FOUNDATION. **Energy Web Origin.** Disponível em: <https://www.energyweb.org/technology/ew-origin/> Acesso em: 16 nov. 2019.

³²¹ GRUNWALD, Vanessa Heidrich. **Aplicações da tecnologia Blockchain na comercialização de energia no Brasil, a Singularidade da Energia, e um possível Ambiente de Contratação Distribuída – ACD.** 2018. 60 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização) - Programa FGV Management, Curitiba, 2018. p. 48.

³²² ENERGY WEB FOUNDATION. **Energy Web Origin.** Disponível em: <https://www.energyweb.org/technology/ew-origin/> Acesso em: 16 nov. 2019.

- a) PTT na Tailândia: PTT e EW cooperaram para construir um mercado digital pronto para produção para certificados de energia renovável na Tailândia, de acordo com o padrão I-REC.
- b) Foton na Turquia: Foton e EW cooperaram para construir um mercado digital pronto para produção para certificados de energia renovável na Turquia, de acordo com o padrão I-REC. O mercado está em funcionamento e acessível a compradores e vendedores de energia renovável.
- c) PJM³²³ em 14 estados dos EUA: A PJM e a EW cooperaram em uma parceria de um ano para testar ferramentas baseadas em *blockchain* (incluindo o Origin SDK) para criar um mercado digital para RECs voluntários.
- d) NV Energy em Nevada, EUA: EW, *Blockchains LLC* e a *Public Utility Commission* (PUC) de Nevada cooperaram no teste de tecnologias baseadas em *blockchain*, incluindo o *Origin* SDK e seu módulo emissor, para criar um moderno sistema de rastreamento para certificados de energia renovável de Nevada (“PEC”).

Além da *Origin*, a EWF também desenvolveu um mecanismo de busca global para certificados de energia renovável e outros produtos de descarbonização, que são *tokenizados* na *EW Chain*, denominado Zero. O objetivo do Zero é simplificar os processos de aquisição, aumentar a transparência sobre as opções disponíveis e acelerar a descarbonização ao combinar compradores e vendedores em todo o mundo.³²⁴

³²³ PJM Interconexão coordena a distribuição de eletricidade através de toda ou parte de Delaware, Illinois, Indiana, Kentucky, Maryland, Michigan, New Jersey, Carolina do Norte, Ohio, Pensilvânia, Tennessee, Virgínia, Virgínia Ocidental e o Distrito de Columbia. Disponível em: <https://www.pjm.com/> Acesso em: 01 abr. 2022.

³²⁴ ENERGY WEB FOUNDATION. **Energy Web Origin**. Disponível em: <https://www.energyweb.org/technology/ew-origin/> Acesso em: 16 nov. 2019.

6 CONCLUSÕES

As políticas públicas mundiais estão direcionadas para a geração de energia elétrica renovável, dada a compreensão de que não há outra alternativa para se alcançar a sustentabilidade energética, e o desabastecimento energético levaria a um colapso da civilização como atualmente conhecemos, pois, a manutenção do modo de vida das sociedades modernas exige grandes quantidades de energia elétrica. As energias renováveis são em sua maioria livres da emissão de carbono, trazendo assim benefícios ao meio ambiente ao contribuir para evitar o aquecimento global e seus impactos na natureza.

O Brasil tem uma matriz energética com aproximadamente 83% composta por energia renovável, muito melhor que a matriz energética mundial que é composta por apenas 27% de energia renovável. Essa situação decorre do fato que quase dois terços da geração de energia elétrica no Brasil é realizada por hidrelétricas, que apesar do impacto ambiental de sua construção, produz energia sem a utilização da queima de combustíveis fósseis.

As fontes renováveis, contudo, têm maior dependência dos fatores climáticos e isso leva a uma intermitência na geração de eletricidade, e a uma maior complexidade no gerenciamento do sistema elétrico para manter sua estabilidade. Para amenizar esse problema, a Lei Federal n. 14.300/2022 que constituiu o Marco Civil da Geração Distribuída (GD), introduziu a exigência de fontes despacháveis para a minigeração distribuída, de forma a trazer mais estabilidade na geração de energia renovável.

A convergência tecnológica e científica da atualidade, já possibilita um projeto para o setor elétrico que permita que a descarbonização, a descentralização e a digitalização tragam benefícios ao meio ambiente, ao abastecimento de energia renovável e viabilize um mercado totalmente novo para a comercialização de energia elétrica. Esse comércio não permanecerá da forma unidirecional e centralizada, como o que existe atualmente, onde a energia é transmitida apenas dos geradores para os consumidores, mas será bidirecional e descentralizado, onde os prosumidores gerarão sua própria energia elétrica, comercializando o excedente nos picos de geração ou adquirindo a energia necessária quando sua geração for insuficiente.

Essa rápida transformação que o setor elétrico está passando para acomodar os volumes crescentes de geração de energia elétrica renovável incorporada, de natureza intermitente, como eólica e solar fotovoltaica, foi possibilitada pela privatização, incentivos financeiros e políticas públicas energéticas e traz novos desafios na gestão e operação dos sistemas elétricos, para garantir a segurança e a estabilidade das redes elétricas.

O estímulo da inserção de fontes despacháveis na geração distribuída trazido pela recente Lei Federal n. 14.300/2022 contribui para esse objetivo, mas para atingir metas ambiciosas na redução de emissões de carbono na atmosfera, investimentos significativos ainda precisam ser realizados nos sistemas de energia elétrica.

As políticas públicas no setor elétrico tiveram recentes modificações legislativas e regulamentares, sendo que a referida Lei Federal n. 14.300/2022 e a Resolução Normativa n. 1000 da Aneel são exemplos de que há uma atenção especial dedicada ao setor elétrico. Essas novas normas deram a direção e estímulos para que o setor elétrico possa cada vez integrar mais Recursos Energéticos Distribuídos (REDs) em seu bojo, crescendo de forma descentralizada e distribuída, atraindo investimentos privados e assim desonerando o Estado desse papel.

Essas novas normas deixam transparecer as políticas públicas pensadas para o setor elétrico, que de forma harmônica e equilibrada conseguiram construir soluções para situações de desequilíbrio existentes, tal como a transição gradual entre a compensação integral atualmente existente, até o repasse integral aos prosumidores desses custos das componentes tarifárias, mantendo assim os estímulos a esse importante mercado de geração de energia sustentável e gradualmente reduzindo os eventuais subsídios cruzados existentes.

Essa questão da compensação das componentes tarifárias vinha sendo um ponto de divergência entre os defensores da geração distribuída e renovável, e os grupos de interesses das distribuidoras. Enquanto aqueles argumentavam da importância ambiental da energia renovável, estes argumentavam que haviam custos envolvidos e a compensação integral existente onerava os demais consumidores. Assim, compreendeu-se que a política pública precisava incentivar a geração de energia sustentável, por ser a única opção em longo prazo existente para a civilização, mas também precisava repassar gradualmente os crescentes custos envolvidos para os prosumidores, de forma a não onerar excessivamente as distribuidoras de energia.

Assim, o art. 17 da Lei n. 14.300/2022 deu competência ao Conselho Nacional de Política Energética (CNPE) para estabelecer as diretrizes para valoração dos custos e dos benefícios da microgeração e minigeração distribuída, sempre ouvindo a sociedade, as associações e entidades representativas, as empresas e os agentes do setor elétrico. Foi estabelecido que o CNPE além de contabilizar os custos a serem repassados decorrentes da GD, também deverá considerar todos os benefícios e economias que ela propicia.

Em termos de políticas públicas para o setor elétrico, a Lei Federal n. 14.300/2022 trouxe em seu art. 24, a determinação para que a concessionária ou permissionária de energia elétrica promova chamadas públicas para o credenciamento de interessados em comercializar os excedentes de geração de energia oriundos de projetos de microgeradores e minigeradores distribuídos, nas suas áreas de concessão, para posterior compra desses excedentes de energia, na forma de regulamentação da Aneel. A determinação para que esse comércio de créditos de energia elétrica seja criado vem de encontro com as proposições desse estudo, no sentido de demonstrar que a comercialização desses créditos utilizando *tokens* criptográficos em uma rede *blockchain* deve trazer forte investimento privado em geração distribuída renovável.

Considerando a multiplicidade de atores envolvidos na realização desses investimentos, abrangendo o poder público, grandes corporações e até mesmo o pequeno prosumidor, é necessária a utilização de uma gestão e controles inteligentes, atividades cada vez mais desafiadoras em meio de um sistema elétrico crescente e cada vez mais descentralizado, complexo e multiagente.

A utilização de sistemas automatizados e inteligentes para o setor elétrico se inicia na digitalização da informação, que é a criação de uma representação digital (virtual) das informações do mundo físico (real). Essa informação digitalizada pode ser armazenada, transmitida e processada por sistemas computacionais, extraindo da informação bruta coletada vários resultados processados, que são utilizados para tomada de decisão humana ou por sistemas automatizados, maximizando a eficiência do sistema elétrico. A digitalização é a base para se alcançar a descentralização e a descarbonização, utilizando especialmente a geração distribuída de energia renovável.

A digitalização das informações para que sejam analisadas e processadas por computadores, é necessária para que esse ambiente descentralizado proposto funcione harmoniosamente, na medida em que a energia elétrica é gerada e consumida pelas cargas quase instantaneamente, e por isso os sistemas de controle de geração, transmissão, distribuição e demanda de carga (consumo) devem ser gerenciados em tempo real.

O setor elétrico brasileiro tende a ser muito modificado pela digitalização, que especialmente utilizando a tecnologia *blockchain*, levará à criação de redes inteligentes com maior capacidade de medição e melhor controle dos ativos energéticos existentes, criando condições para uma operação confiável e eficiente mesmo em um contexto de maior relevância do prosumidor no funcionamento do sistema elétrico.

Nesse sentido, a Empresa de Pesquisa Energética (EPE) em seu estudo PNE 2050 já observou que as técnicas de registro de informações baseadas em sistemas de livro-razão distribuído, que é a base da tecnologia *blockchain*, surgem com potencial para tratar com essas transformações, na medida em que possibilitam registros inalteráveis, rastreabilidade e verificação dos dados.

A comunicação e armazenamento de dados avançados entre os atores da rede de energia são cada vez mais necessários, dificultando um controle centralizado. As técnicas de controle e gerenciamento distribuído local são essenciais para acomodar essas tendências de descentralização e digitalização. A *blockchain* foi projetada principalmente para a realização de transações distribuídas dispensando um gerenciamento centralizado. Assim, a *blockchain* pode ajudar a enfrentar os desafios dos sistemas de energia descentralizados.

A crescente descentralização da infraestrutura do setor elétrico converge com as possibilidades e recursos da tecnologia *blockchain*, a qual pode armazenar transações digitais com segurança sem usar um ponto centralizado de autoridade, viabilizando uma infraestrutura para a comunicação e registro das informações digitalizadas oriundas dos REDs.

A *blockchain* permite ainda a utilização de contratos inteligentes, inclusive em redes ponto a ponto, viabilizando micro transações que só se tornam economicamente viáveis em grandes quantidades, em função do baixo custo de transação. Assim, o banco de dados das transações independe de um ente centralizador, que elevaria os custos de transação e reduziria a escalabilidade da rede, permitindo que vários usuários façam alterações no livro-razão simultaneamente e a cheguem a um acordo sobre o estado válido do livro-razão com as técnicas de consenso. As formas pela qual o consenso é alcançado numa rede *blockchain* é objeto de contínua pesquisa e novos avanços científicos estão acontecendo, e conforme a aplicação pretendida, o tipo de consenso precisa se ajustar às necessidades do projeto.

O grande potencial da utilização da tecnologia *blockchain* está no fato de que ela pode redefinir a confiança digital e remover intermediários, formando um novo paradigma de gerenciamento que pode potencialmente interromper as formas tradicionais de governança, substituindo o controle vertical pelo consenso distribuído, código aberto, transparência e tomada de decisão baseada na comunidade dos atores do setor elétrico.

Os REDs representam uma enorme oportunidade e a *blockchain* é a chave para desbloqueá-la, na medida em que pode ser usada para gerenciar identidades digitais dos REDs, integrá-los perfeitamente à rede, compartilhar dados entre eles, realizar medições e verificações confiáveis e desbloquear a liquidação quase instantânea para serviços de rede, e tudo isso com custos de transação extremamente baixos. Com as tecnologias digitais e

descentralizadas é possível oferecer aos operadores de rede o acesso a milhões de REDs, que são capazes de gerar valor para todos os participantes envolvidos nesse mercado, e ainda tornando os programas de gerenciamento da resposta da demanda mais eficientes e disseminados.³²⁵

Diversas empresas e consórcios estão desenvolvendo plataformas de *blockchain* focadas no setor elétrico, e já surgem resultados animadores, tais como o *EW Chain*, da *Energy Web Foundation*, que traz uma tecnologia que não exige grande consumo de energia para geração dos *tokens*, tem grande escalabilidade e suporta aplicativos corporativos.

A digitalização do setor elétrico através do uso de *tokens* de energia, ainda permitirá uma melhoria das políticas públicas, seja pelo conhecimento preciso de como a geração e o consumo se distribuem geograficamente, seja pelo estímulo ao uso de energia renovável que poderá ter sua geração e consumo acompanhados em tempo real, trazendo valor de mercado diverso para diferentes tecnologias de geração ou ainda com formas de controlar a resposta da demanda de maneira econômica e socialmente adequadas.

Questões emergentes estão relacionadas ao anonimato do usuário, privacidade e governança dos sistemas *blockchain*, que muitas vezes vão contra as práticas tradicionais adotadas por governos e indústrias. A proteção da privacidade dessa informação é uma delas, pois ao mesmo tempo em que o acesso aos dados de geração e consumo faz parte das condições para o aprimoramento das políticas públicas e do planejamento e operação do sistema, crescem as preocupações acerca de situações como invasão de privacidade e segurança da informação. Para resolver essa situação há soluções como acesso restrito à informação ou o uso das chamadas “provas de conhecimento zero”, que são técnicas de criptografia usadas para provar que se sabe algo sem revelar o que é e de que forma se consegue descobrir, permitindo assim a implementação de funções para validar possíveis desvios da solicitação e liquidar a atividade do prosumidor sem que a informação fique disponível a todos.

Assim, é importante a compreensão de que essas novas tecnologias de geração de energia elétrica sustentável, integradas com plataformas tecnológicas que permitam a *tokenização* do setor elétrico, tanto para fins de funcionalidade operacional, tanto para viabilizar um novo tipo de mercado bidirecional no comércio de energia elétrica, devem levar

³²⁵ MORRIS, Jesse. **In energy, blockchain is not equal to peer to peer**. Disponível em: <https://www.disruptordaily.com/in-energy-blockchain-is-not-equal-to-peer-to-peer/> Acesso em: 17 nov. 2019.

investimentos privados expressivos no setor elétrico, que tornarão a energia elétrica muito mais barata e ecológica, promovendo nesse processo o desenvolvimento econômico e social.

A *tokenização* proposta para os créditos de energia elétrica deve propiciar uma grande oportunidade para o empreendedorismo e para a geração de novos negócios no setor de energia, viabilizando que tanto empresas como particulares possam investir em geração distribuída, gerando uma rápida ampliação do sistema elétrico brasileiro, ainda mais resiliente e ambientalmente sustentável, trazendo todos os benefícios econômicos e sociais decorrentes da correlação existente entre o aumento do PIB dos países e o consumo/fornecimento de energia elétrica.

Assim, para a digitalização do setor elétrico, a tecnologia *blockchain* e as estratégias de consenso distribuído apresentadas demonstram vantagens significativas se comparadas ao sistema centralizado de armazenamento, tais como, maior segurança, resistência à censura e transparência, escalabilidade e velocidade para o registro das transações, que podem ser úteis para uma variedade de aplicações e casos de uso. Dessa forma, entende-se que é possível validar a hipótese da digitalização do setor elétrico utilizando a tecnologia *blockchain*, e que ela permite uma melhoria das políticas públicas, dos investimentos privados em microgeração e no mercado de consumo de energias renováveis distribuídas.

A compreensão de que atualmente a melhor forma de lidar com os recursos energéticos distribuídos é através de sistemas descentralizados e distribuídos de armazenamento da informação digitalizada, e que através de algoritmos e sistemas de criptografia e segurança de dados, consegue-se alcançar a escalabilidade, capacidade de processamento para o alto volume de transações e segurança da informação necessárias, podendo levar o setor elétrico a viabilizar grandes investimentos em novos produtos e serviços, promovendo em especial o desenvolvimento sustentável no aspecto econômico e social.

REFERÊNCIAS

- ABINEE. **Painel debate transição energética e digitalização do setor elétrico**. Publicado em: 24/07/2019. Disponível em: <http://www.abinee.org.br/noticias/com53.htm> Acesso em: 03 nov. 2019.
- ABRADEE. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE DISTRIBUIDORES DE ENERGIA ELÉTRICA. **A distribuição de energia**. Disponível em: <https://www.abradee.org.br/setor-de-distribuicao/a-distribuicao-de-energia/> Acesso em: 10 mar. 2022.
- ABRAPCH. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PCHS E CGHS. **O que são PCH's e CGH's**. Disponível em: <https://abrapch.org.br/o-setor/o-que-sao-pchs-e-cghs/> Acesso em: 05 mar. 2022.
- ALBAENERGIA. **Taxar o sol: governo volta a discutir imposto sobre energia solar**. Publicado em: 25/06/2021. Disponível em: <https://albaenergia.com.br/taxar-o-sol-governo-volta-a-discutir-imposto-sobre-energia-solar/> Acesso em: 10 jul. 2021.
- ANDONI, Merlinda *et al.* Blockchain technology in the energy sector: A systematic review of challenges and opportunities. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 100, Feb. 2019, pp. 143-174. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032118307184?via%3Dihub> Acesso em: 28 mar. 2022.
- ANEEL. AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Cálculo tarifário e metodologias**. Receita Anual Permitida. Disponível em: <https://bit.ly/3xFDHah> Acesso em: 08 mar. 2022.
- ANEEL. AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Componentes da Tarifa de Uso dos Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica – TUSD**. Disponível em: <https://bit.ly/3rCys7z> Acesso em: 22 jan. 2022.
- ANEEL. AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Carvão Mineral**. In: Atlas de Energia Elétrica do Brasil (Capítulo 9). pp. 131-141. Disponível em: http://www2.aneel.gov.br/arquivos/PDF/atlas_par3_cap9.pdf Acesso em: 06 mar. 2022.
- ANEEL. AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Geração Distribuída**. Disponível em: <https://www.Aneel.gov.br/geracao-distribuida> Acesso em 08 nov. 2019.
- ANEEL. AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Informações Técnicas. Legislação**. Disponível em: <https://www2.Aneel.gov.br/area.cfm?idArea=50&idPerfil=2> Acesso em: 08 nov. 2019.
- ANEEL. AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **No Dia Mundial da Água, Aneel publica infográfico sobre hidrelétricas no Brasil**. Disponível em: <https://bit.ly/3rzpl7y> Acesso em: 17 jan. 2022.

ANEEL. AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Nota Técnica n. 0020/2012-SRD/ANEEL**. Disponível em: https://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/audiencia/arquivo/2011/042/resultado/nota_tecnica_0020_daniel_srd.pdf Acesso em: 09 nov. 2019.

ANEEL. AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Regulação dos Serviços de Distribuição**. Disponível em: <https://bit.ly/3Kb8qPn> Acesso em: 10 mar. 2022.

ANEEL. AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução Normativa n. 414, de 9 de setembro de 2010**. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2010414.pdf> Acesso em: 10 mar. 2022.

ANEEL. AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução Normativa n. 482, de 17 de abril de 2012**. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf> Acesso em: 08 mar. 2022.

ANEEL. AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução Normativa n. 559, de 27 de junho de 2013**. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2013559.pdf> Acesso em: 08 mar. 2022.

ANEEL. AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução Normativa n. 875, de 10 de março de 2020**. Disponível em: <https://bit.ly/3jYOWMP> Acesso em: 05 mar. 2022.

ANEEL. AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução Normativa n. 1.000, de 7 de dezembro de 2021**. Disponível em: <https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren20211000.pdf> Acesso em: 12 fev. 2022.

ANEEL. AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Revisão das regras aplicáveis à micro e minigeração distribuída**. Relatório de Análise de Impacto Regulatório n. 0004/2018-SRD/SCG/SMA/Aneel. Brasília, 06/12/2018. Versão nº 1, Pré-Participação Pública. Disponível em: <https://static.poder360.com.br/2020/01/aneel-proposta.pdf> Acesso em: 03 out. 2020.

BEVILACQUA, Rafael. **O blockchain pode substituir as clearings?** [mensagem pessoal] Mensagem recebida em: arleijunior@gmail.com Data de recebimento: 08 abr. 2022.

BINANCE ACADEMY. **O que é Proof of Authority?** Disponível em: <https://www.binance.vision/pt/blockchain/proof-of-authority-explained> Acesso em: 10 nov. 2019.

BLANCHET, Luiz Alberto; OLIVEIRA, Edson Luciani de. Tributação da energia no Brasil: necessidade de uma preocupação constitucional extrafiscal e ambiental. **Sequência** (Florianópolis), n. 68, p. 159-187, jun. 2014. Disponível em: <https://periodicos.ufsc.br/index.php/sequencia/article/view/2177-7055.2013v35n68p159> Acesso em: 03 fev. 2022.

BLANCHET, Luiz Alberto. O serviço público de energia elétrica e o desenvolvimento: a sustentabilidade energética. In: GONÇALVES, Oksandro; FOLLONI, André; SANTANO, Ana Cláudia (Coord.) **Direito econômico & socioambiental: por interconexões entre o desenvolvimento e a sustentabilidade**. Curitiba: Íthala, 2016.

BLOXS INVESTIMENTOS. **Tokenização: guia rápido para saber o que é e seu impacto nos investimentos**. Disponível em: <https://conteudos.bloxs.com.br/tokenizacao-guia-o-que-e-e-seu-impacto-nos-investimentos> Acesso em: 09 abr. 2022.

BRASIL. CÂMARA DOS DEPUTADOS. **Projeto cobra encargos de distribuição de micro e minigeração de energia elétrica**. Publicado em: 17/01/2020, no portal Agência Câmara de Notícias. Disponível em: <https://www.camara.leg.br/noticias/631158-projeto-cobra-encargos-de-distribuicao-de-micro-e-minigeracao-de-energia-eletrica/> Acesso em: 10 jul. 2021.

BRASIL. CÂMARA DOS DEPUTADOS. **Projeto de Lei n. 5829/2019**. Disponível em: <https://www.camara.leg.br/propostas-legislativas/2228151> Acesso em: 10 jul. 2021.

BRASIL. CÂMARA DOS DEPUTADOS. **Lei n. 14.300, de 6 de janeiro de 2022: Marco Legal da Microgeração e Minigeração Distribuída**. Disponível em: <https://www2.camara.leg.br/legin/fed/lei/2022/lei-14300-6-janeiro-2022-792217-norma-pl.html> Acesso em: 20 jan. 2022.

BRASIL. CÂMARA DOS DEPUTADOS. **Lei n. 14.195, de 26 de agosto de 2021**. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/ato2019-2022/2021/lei/L14195.htm Acesso em: 10 mar. 2022.

BRASIL. CÂMARA DOS DEPUTADOS. **Lei n. 14.300/2022**. Disponível em: <https://www2.camara.leg.br/legin/fed/lei/2022/lei-14300-6-janeiro-2022-792217-veto-164336-pl.html> Acesso em: 20 jan. 2022.

CANALSOLAR. **Lei 14.300: principais mudanças do Marco Legal da GD**. Disponível em: <https://canalsolar.com.br/lei-14-300-principais-mudancas-do-marco-legal-da-gd/> Acesso em: 20 jan. 2022.

CANALSOLAR. **Resolução n. 1.000 da Aneel é publicada e revoga REN 414**. Disponível em: <https://bit.ly/3vwZ4rS> Acesso em: 10 mar. 2022.

CASTILLO, Michael del. **Nasdaq explores how blockchain could fuel solar energy market**. Disponível em: <https://www.coindesk.com/nasdaq-blockchain-solar-power-market/> Acesso em: 29 mar. 2022.

CASTRO, Nivalde de; LIMA, Antônio; PEREIRA, Guillermo. **Perspectivas da tecnologia blockchain no Setor Elétrico: Aplicações na Europa, na Austrália e nos Estados Unidos**. GESEL – Grupo de Estudos do Setor Elétrico (UFRJ). Artigo publicado pela Agência Canal Energia. Disponível em: <https://bit.ly/37uAMXy> Acesso em: 04 nov. 2019.

CBIE. CENTRO BRASILEIRO DE INFRA ESTRUTURA. **O que são hidroelétricas reversíveis?** Disponível em: <https://cbie.com.br/artigos/o-que-sao-hidroeletricas-reversiveis/> Acesso em: 05 mar. 2022.

CEMIG. **Plano estratégico de inovação de tecnologia digital da Cemig (versão reduzida)**. Disponível em: <https://bit.ly/38dSTkb> Acesso em: 03 nov. 2019.

DANIEL, Komesu. **Dinheiro e moeda: o que é e como funciona?** Publicado em 05/05/2014, na página Mundo dos Bancos. Disponível em: <https://mundodosbancos.com/77/dinheiro-moeda/> Acesso em: 04 nov. 2019.

DELOITTE. **Blockchain Enigma. Paradox. Opportunity**. Disponível em: <https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/uk/Documents/Innovation/deloitte-uk-blockchain-full-report.pdf> Acesso em: 31 mar. 2022.

E-CYCLE. **Carvão mineral: o que é e impactos**. Disponível em: <https://www.ecycle.com.br/carvao-mineral/> Acesso em: 06 mar. 2022.

E-CYCLE. **O que é gás natural, seus usos e riscos?** Disponível em: <https://www.ecycle.com.br/gas-natural/> Acesso em: 06 mar. 2022.

E-CYCLE. **Petróleo: o que é e para que serve?** Disponível em: <https://www.ecycle.com.br/petroleo/> Acesso em: 06 mar. 2022.

ELLER, Nery Artur. **Estudo e implementação de um sistema de banco de dados distribuído**. Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação) – Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 1997. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/xmlui/bitstream/handle/123456789/158114/107003.pdf?sequence=1&isAllowed=y> Acesso em: 22 mar. 2022.

ENERGY PEDIA. **Feed-in Tariffs (FIT)**. Disponível em: [https://energypedia.info/wiki/Feed-in_Tariffs_\(FIT\)#Brazil](https://energypedia.info/wiki/Feed-in_Tariffs_(FIT)#Brazil) Acesso em: 09 abr. 2022.

ENERGY BLOCKCHAIN CONSORTIUM. Disponível em: <http://energy-blockchain.org/> Acesso em: 10 nov. 2019.

ENERGY WEB FOUNDATION. Disponível em: <https://www.energyweb.org/> Acesso em: 10 nov. 2019.

ENERGY WEB FOUNDATION. **The Energy Web Chain**. Disponível em: <https://www.energyweb.org/wp-content/uploads/2019/05/EWF-Paper-TheEnergyWebChain-v2-201907-FINAL.pdf> Acesso em 03 nov. 2019.

ENERGY WEB FOUNDATION. **Energy Web Origin**. Disponível em: <https://www.energyweb.org/technology/ew-origin/> Acesso em: 16 nov. 2019.

ENERGY WEB FOUNDATION. **The Grid's New Digital DNA**. Disponível em: <https://www.energyweb.org/technology/energy-web-chain/> Acesso em: 16 nov. 2019.

ENGERATI. **Blockchain Europe: Utilities pilot peer-to-peer energy trading**. Disponível em: <https://www.engerati.com/smart-infrastructure/blockchain-europe-utilities-pilot-peer-to-peer-energy-trading/> Acesso em: 10 mar. 2022.

EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Consumo de Gás Natural**. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/areas-de-atuacao/petroleo-gas-e-biocombustiveis/consumo-de-g%C3%AAs-natural> Acesso em: 05 mar. 2022.

EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Energia eólica no Nordeste**. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/imprensa/noticias/epe-publica-fact-sheet-energia-eolica-no-nordeste-e-o-boletim-trimestral-de-energia-eolica-junho-2020-> Acesso em: 05 mar. 2022.

EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Expansão da Geração: Fontes Hidrelétricas**. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/areas-de-atuacao/energia-eletrica/expansao-da-geracao/fontes> Acesso em: 04 mar. 2022.

EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Matriz Energética e Elétrica**. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica> Acesso em: 17 fev. 2022.

EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Oferta e Infraestrutura de Gás Natural**. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/areas-de-atuacao/petroleo-gas-e-biocombustiveis/oferta-e-infraestrutura-de-g%C3%AAs-natural> Acesso em: 06 mar. 2022.

EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Papel da Biomassa na Expansão da Geração de Energia Elétrica**. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-227/topico-457/Biomassa%20e%20Expans%C3%A3o%20de%20Energia.pdf> Acesso em: 05 mar. 2022.

EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2026**. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-40/PDE2026.pdf> Acesso em: 07 mar. 2022.

EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Plano Nacional de Energia 2050**. Disponível em: <https://bit.ly/3v4wWgB> Acesso em: 06 mar. 2022.

EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Usinas Hidrelétricas Reversíveis (UHR): Desafios para inserção em mercados de energia elétrica**. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-561/EPE-DEE-NT-013_2021-r0.pdf Acesso em: 05 mar. 2022.

EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Recursos Energéticos Distribuídos: Impactos no Planejamento Energético**. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/sites-pt/sala-de-imprensa/noticias/Documents/ND%20-%20Recursos%20Energ%C3%A9ticos%20Distribu%C3%ADdos.pdf> Acesso em: 04 nov. 2019.

ESFERAENERGIA. **Os 3Ds de energia: descarbonização, descentralização e digitalização**. Disponível em: <https://esferaenergia.com.br/blog/descarbonizacao-descentralizacao-digitalizacao> Acesso em: 13 nov. 2021.

ETHEREUM. Disponível em: <https://ethereum.org/> Acesso em: 09 nov. 2019.

EXPRESSVPN. **Zero-knowledge proofs explained (Part 1)**. Disponível em: <https://www.expressvpn.com/blog/zero-knowledge-proofs-explained/> Acesso em: 01 abr. 2022.

FOXBIT. **O que são bases de dados centralizadas, descentralizadas e distribuídas?** Disponível em: <https://foxbit.com.br/blog/diferenca-entre-as-bases-de-dados-blockchain/> Acesso em: 23 mar. 2022.

G1. **Usinas termelétricas a carvão auxiliam no combate à crise hídrica no Brasil**. Disponível em: <https://g1.globo.com/sc/santa-catarina/especial-publicitario/siecesc/carvao-mineral-futuro-sustentavel/noticia/2021/10/20/usinas-termeletricas-a-carvao-auxiliam-no-combate-a-crise-hidrica-no-brasil.ghtml> Acesso em: 06 mar. 2022.

GOMES, Ezequiel. **A diferença entre “blockchain” e “DLT” (tecnologia distribuída de livro-razão)**. Publicado em 27/05/2018, no portal Guia do Bitcoin. Disponível em: <https://guiadobitcoin.com.br/a-diferenca-entre-blockchain-e-dlt-tecnologia-distribuida-de-livro-razao/> Acesso em: 03 nov. 2019.

GRIDHUB. **Mudanças propostas em revisão de REN 482 geram divergências**. Disponível em: https://www.griclub.org/news/infrastructure/mudancas-propostas-em-revisao-de-ren-482-geram-divergencias_933.html Acesso em: 08 nov. 2019.

GRID SINGULARITY. **Grid Singularity website**. Disponível em: <http://gridsingularity.com/#/> Acesso em: 29 mar. 2022.

GRUNWALD, Vanessa Heidrich. **Aplicações da tecnologia Blockchain na comercialização de energia no Brasil, a Singularidade da Energia, e um possível Ambiente de Contratação Distribuída – ACD**. 2018. 60 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização) – Programa FGV Management, Curitiba, 2018.

GURGEL COSTA, Victor Hugo; BRAGA JUNIOR, MORAES, Sérgio Alexandre de. **Políticas públicas e sustentabilidade para a universalização do acesso à energia elétrica**. Disponível em: <http://www.publicadireito.com.br/artigos/?cod=dbc1c85e4b057d60> Acesso em: 12 out. 2016.

HIRTH, Lion; UECKERDT, Falko; EDENHOFER, Ottmar. **Why wind is not coal: On the economics of electricity**. Fondazione Eni Enrico Mattei, 2014. Disponível em: https://www.feem.it/m/publications_pages/20144161625104NDL2014-039.pdf Acesso em: 10 nov. 2019.

IBICT – INSTITUTO BRASILEIRO DE INFORMAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA. **Petróleo**. Disponível em: <https://livroaberto.ibict.br/bitstream/1/582/8/07%20-%20Petr%C2%BEleo%282%29.pdf> Acesso em: 06 mar. 2022.

IBM. **Energy blockchain labs inc**. Disponível em: <https://www.ibm.com/case-studies/energy-blockchain-labs-inc> Acesso em: 29 mar. 2022.

IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Data and statistics**. Disponível em: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-browser?country=WORLD&fuel=Electricity%20and%20heat&indicator=ElecGenByFuel> Acesso em: 04 mar. 2022.

INDIGO ADVISORY GROUP. **Blockchain in energy and utilities**. Use cases, vendor activity, market analysis. Disponível em: <https://www.indigoadvisorygroup.com/blockchain> Acesso em: 29 mar. 2022.

INFOMONEY. **Sobre Ethereum**. Disponível em: <https://www.infomoney.com.br/cotacoes/ethereum-eth/> Acesso em: 09 nov. 2019.

INSTITUTO TOTUM. **Certificação de energia renovável cresce acima das expectativas**. Disponível em: <https://www.institutototum.com.br/index.php/noticias/28-programa-de-certificacao-de-energia-renovavel/312-certificacao-de-energia-renovavel-cresce-acima-das-expectativas> Acesso em: 16 nov. 2019.

INVESTOPEDIA. **Block Time**. Disponível em: <https://www.investopedia.com/terms/b/block-time-cryptocurrency.asp> Acesso em: 10 nov. 2019.

ISTOÉ. **Prosumidor: A palavra do futuro – Em breve, você será também**. Disponível em: <https://istoe.com.br/prosumidor-a-palavra-do-futuro-em-brevevoce-sera-tambem/> Acesso em: 02 nov. 2019.

JACOBSEN, Sergio. **A digitalização veio para revolucionar o sistema elétrico brasileiro**. Disponível em: <https://new.siemens.com/br/pt/empresa/stories/energia/digitalizacao-revoluciona-sistema-energetico-brasileiro.html> Acesso em: 21 mar. 2022.

MACDONALD-MURRAY, Jamie. **Forte crescimento previsto para a energia renovável do Brasil em 2022**. Disponível em: <https://canalsolar.com.br/forte-crescimento-previsto-para-a-energia-renovavel-do-brasil-em-2022/> Acesso em: 05 mar. 2022.

MAFFINI, Maylin. **As tendências regulatórias das criptomoedas rumo à desmaterialização da moeda**. Dissertação (Mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Curitiba, 2020.

MATTILA, Juri *et al.* **Industrial blockchain platforms: an exercise in use case development in the energy industry**. Disponível em: <https://www.econstor.eu/bitstream/10419/201258/1/ETLA-Working-Papers-43.pdf> Acesso em: 31 mar. 2022.

MATTILA, Juri. “The Blockchain Phenomenon” – The Disruptive Potential of Distributed Consensus Architectures. **ETLA Working Papers 38**, The Research Institute of the Finnish Economy, 2016. Disponível em: <https://ideas.repec.org/p/rif/wpaper/38.html> Acesso em: 31 mar. 2022.

MEARIN, Lucas. **Como o blockchain está se tornando o 5G da indústria de pagamentos**. Disponível em: <https://computerworld.com.br/2019/03/29/como-o-blockchain-esta-se-tornando-o-5g-da-industria-de-pagamentos/> Acesso em: 09 nov. 2019.

MEDIUM. **Análise dos algoritmos de consenso.** Disponível em: <https://medium.com/@creditsbrasil/an%C3%A1lise-dos-algoritmos-de-consenso-87923a9c367b> Acesso em: 10 nov. 2019.

MEDIUM. **What's the difference between blockchain & distributed ledger technology?** Disponível em: <https://medium.com/blockchain-review/whats-the-difference-between-blockchain-distributed-ledger-technology-19407f2c2216> Acesso em: 02 nov. 2019.

MORRIS, Jesse. **In energy, blockchain is not equal to peer to peer.** Disponível em: <https://www.disruptordaily.com/in-energy-blockchain-is-not-equal-to-peer-to-peer/> Acesso em: 17 nov. 2019.

MUFTIC, Sead. **Overview and analysis of the concept and applications of virtual currencies.** Disponível em: <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC105207> Acesso em: 31 mar. 2022.

NAÇÕES UNIDAS. **ONU pede comprometimento com Acordo de Paris sobre o clima.** Disponível em: <https://nacoesunidas.org/onu-pede-comprometimento-com-acordo-de-paris-clima/> Acesso em: 03 nov. 2019.

NAKAMOTO, Satoshi. **Bitcoin: a peer-to-peer electronic cash system.** Disponível em: <https://bitcoin.org/bitcoin.pdf> Acesso em: 12 jan. 2022.

NASCIMENTO, Alex. **Tokenização de ativos alternativos é o futuro do mercado de investimentos.** Disponível em: <https://www.moneytimes.com.br/alex-nascimento-tokenizacao-de-ativos-alternativos-e-o-futuro-do-mercado-de-investimentos/> Acesso em: 09 abr. 2022.

NEOWAY. **O que é Big Data e qual a importância de implementá-lo na empresa?** Disponível em: <https://www.neoway.com.br/o-que-e-big-data/> Acesso em: 03 nov. 2019.

NEVES, Livia. **Pequenas Centrais Hidrelétricas: qual o papel no futuro do setor elétrico?** Disponível em: <https://www.way2.com.br/blog/pequenas-centrais-hidreletricas/> Acesso em: 05 mar. 2022.

OBJETIVOS DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL. **Transformando Nosso Mundo: A Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável.** Disponível em: <https://odsbrasil.gov.br/home/agenda> Acesso em: 03 mar. 2022.

POP, Claudia D.; ANTAL, Marcel; CIOARA, Tudor; ANGHEL, Ionut; SALOMIE, Ioan. "Blockchain and Demand Response: zero-knowledge proofs for energy transactions privacy". **Sensors**, v. 20, n. 19: 5678. 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/s20195678>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/20/19/5678/htm> Acesso em: 29 mar. 2022.

PORTALSOLAR. **Como funciona o Pannel Solar Fotovoltaico (Placas Fotovoltaicas).** Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/como-funciona-o-pannel-solar-fotovoltaico.html> Acesso em: 06 mar. 2022.

REIS, Tiago. **O que é lastro e como ele funciona para garantir o valor de um ativo.**

Publicado em Suno Research. Disponível em:

<https://www.sunoresearch.com.br/artigos/lastro/> Acesso em: 04 nov. 2019.

REVOREDO, Tatiana. **A tokenização do mercado de ações.** Disponível em:

<https://cointimes.com.br/a-tokenizacao-do-mercado-de-acoes/> Acesso em: 09 nov. 2019.

RIVAS, Katherine. **Rio assina protocolo de intenções com a Nasdaq para ter bolsa de créditos de carbono.** Disponível em: <https://www.infomoney.com.br/mercados/rio-vai-ter-nova-bolsa-em-parceria-com-nasdaq-para-negociar-creditos-de-carbono/> Acesso em: 31 mar. 2022.

RODRIGUES, Charlana Majory de Sá. **Estudo comparativo de algoritmos de compressão de imagens para transmissão em redes de computadores.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2005. Disponível em:

<https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/5622> Acesso em: 21 mar. 2022.

RUBIM, Bárbara. **Lei 14.300: valoração dos créditos e como ficou o custo de disponibilidade (Parte 02).** Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=dOW8EZUzD4c> Acesso em: 20 fev. 2022.

SANTOS, Reive Barros dos. **Painel debate transição energética e digitalização do setor elétrico.** Publicado em: 24 de julho de 2019. In: Portal ABINEE – Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica. Disponível em: <http://www.abinee.org.br/noticias/com53.htm> Acesso em: 03 nov. 2019.

SCHWAB, Klaus. **The Fourth Industrial Revolution.** World Economic Forum, 2016. Geneva.

SILVA, Adriano Jeronimo da. **Leilões de certificados de energia elétrica: máximo excedente versus máxima quantidade negociada.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual de Campinas, 2003.

TAB ENERGIA. **PL 5829/Lei 14.300: o impacto do marco legal da energia solar.** Disponível em: <https://tabenergia.com.br/blog/pl-5829-lei-14-300-o-impacto-do-marco-legal-da-energia-solar/> Acesso em: 02 fev. 2022.

TEIDER, Josélio Jorge. **A regulamentação no Brasil dos contratos inteligentes implementados pela tecnologia blockchain.** Dissertação (Mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Curitiba, 2019.

TECMUNDO. **Governo planeja construir nova usina nuclear no Brasil até 2031.**

Disponível em: <https://www.tecmundo.com.br/ciencia/228365-governo-planeja-construir-nova-usina-nuclear-brasil-2031.htm> Acesso em: 06 mar. 2022.

VADDEPALLI, Surendar; ANTONY, Laly. Are economic factors driving bitcoin transactions? An analysis of select economies. **Journal of Emerging Issues in Economics, Finance and Banking (JEIEFB)**, 2017, v. 6, n. 2, ISSN: 2306-367X. Disponível em: <https://bit.ly/3Mdm04y> Acesso em: 02 abr. 2022.