

DO BITCOIN À GERAÇÃO DISTRIBUÍDA AS POTENCIALIDADES DA BLOCKCHAIN PARA O SETOR ELÉTRICO

Diogo Lisboa Romeiro

Universidade Federal do Rio de Janeiro

RESUMO

A *blockchain* (BC) é a tecnologia que viabiliza as moedas criptográficas virtuais. Com objetivo de assegurar autenticidade, proveniência e propriedade dos ativos com transparência, validando a transferência mediante consenso, a BC pode ser empregada para qualquer representação digital de ativos físicos. No setor elétrico, a BC pode contribuir para descentralização dos sistemas, favorecendo a conectividade física e virtual de recursos e agentes. Já existem exemplos pioneiros e promissores de aplicação da BC no setor elétrico que revelam o seu potencial para facilitar a incorporação de recursos de energia distribuídos, potencialmente via micro-redes. A BC reforça o caráter estratégico das redes, na direção das transformações em curso que acenam para um futuro compartilhado, distribuído e interconectado.

Palavras-chave: geração distribuída, recursos distribuídos, blockchain, micro-redes.

ABSTRACT

The blockchain (BC) is the technology that enables virtual cryptocurrency. In order to ensure authenticity, provenance and ownership of the assets with transparency, validating the transfer by consensus, BC can be used for any digital representation of physical assets. In the power sector, BC can contribute to the system decentralization, favoring the physical and virtual connectivity of resources and agents. There are already pioneering and promising examples of BC application in the power sector that reveal its potential to facilitate the incorporation of distributed energy resources, potentially via microgrids. The BC reinforces the strategic nature of the grid, in the direction of the ongoing transformations that beckon for a shared, distributed and interconnected future.

Keywords: distributed generation, distributed resources, blockchain, microgrids.

1. INTRODUÇÃO

O papel-moeda e a eletricidade são dois inventos notáveis, cruciais para a modernidade, que compartilham uma importante propriedade: ambos necessitam de uma autoridade central que garanta a sua confiabilidade.

Do padrão ouro à moeda fiduciária, a confiança no papel-moeda como meio circulante de aceitação inquestionável repousa na confiança depositada no Estado emissor. O Estado impõe curso forçado e poder liberatório ao papel-moeda por si emitido em seu território, mas a confiabilidade da moeda também se sujeita ao correto funcionamento de suas funções de unidade de conta, meio de pagamento e reserva de valor. O Banco Central zela pelas funções adequadas da moeda, enquanto que o reconhecimento e a reputação do poder central do Estado garantem a fé pública do papel emitido.

A confiabilidade do suprimento de eletricidade também se estruturou de modo centralizado. Desde a batalha das correntes entre Tesla e Edison que marcou os primórdios da indústria, as vantagens da geração centralizada – com ganhos de escala, escopo e rede, como vislumbrado por Samuel Insull (MUNSON, 2005) – sobressaíram às limitações da geração descentralizada. Grandes plantas de geração interconectadas por malha de transmissão a diferentes centros de carga, com perfis distintos de consumo, propiciaram o desenvolvimento da indústria que marcou o século XX. Face às dificuldades de armazenamento de eletricidade em larga escala comercial, o equilíbrio instantâneo entre oferta e demanda é assegurado por autoridade central que opera a rede, com poder para contingenciar produção ou consumo em casos de risco à confiabilidade do suprimento.

Inovações tecnológicas recentes, no entanto, apontam para a possibilidade de dissociação entre centralização e confiabilidade, tanto para a circulação de moeda, quanto para o consumo de eletricidade.

As moedas virtuais-criptográficas, como o *Bitcoin*, viabilizam transações diretas entre as partes contratantes sem a necessidade de terceira parte mediadora que garanta a confiabilidade do sistema, apoiando-se na tecnologia da *blockchain*. A geração de eletricidade distribuída, liderada pela solar fotovoltaica, e de outros recursos de energia distribuídos (*distributed energy resources* – DER) contestam a supremacia histórica da centralização da rede unidirecional (dos geradores aos consumidores), abrindo espaço para novos modelos de negócios com o surgimento dos *prosumers* (consumidores-produtores-armazenadores), nos termos de Green & Staffell (2017), e de redes multidirecionais.

Ambas as tendências confluem para um futuro distribuído e possivelmente compartilhado, em contraposição a um presente centralizado e individualizado.

Neste horizonte, arranjos descentralizados, com novas estruturas de confiança e menores custos de transação, podem revolucionar o meio e o modo como as transações são estabelecidas e efetuadas, impactando inúmeras indústrias.

O objetivo do presente artigo é apresentar a tecnologia da *blockchain* e seus possíveis transbordamentos para outras áreas, propagados com euforia por seus entusiastas, e apontar as possibilidades abertas para o desenvolvimento de arranjos descentralizados favoráveis a coordenação e integração de recursos distribuídos. Por tratar-se de tema recente e com bibliografia ainda embrionária, a pesquisa foi embasada em relatórios e artigos acadêmicos recentes relacionados à *blockchain* e aos impactos da descentralização para o setor elétrico. Ao traçar o panorama da tecnologia e suas possíveis interseções com o setor, buscou-se apresentar as iniciativas precursoras na área, sinalizando um campo fértil para novas pesquisas e aplicações.

O artigo está estruturado em cinco seções, incluindo esta introdução. A próxima seção apresenta a tecnologia por trás da *blockchain* e a terceira discute os seus possíveis desdobramentos e aplicações. A quarta seção é dedicada às potencialidades da *blockchain* em contexto de elevada interconectividade de recursos e agentes que emerge no sistema elétrico em transformação, seguida pelas considerações finais.

2. BLOCKCHAIN: A ENGENHOCA POR TRÁS DO BITCOIN

Em 2008, Satoshi Nakamoto, pseudônimo de identidade desconhecida, publicou um artigo de nove páginas propondo um mecanismo capaz de operacionalizar uma moeda eletrônica que transitasse diretamente entre as partes contratantes sem passar por alguma instituição central intermediária (*trusted third party*). O desafio estava em estabelecer algum mecanismo que garantisse a autenticidade da moeda digital e a transparência na contabilidade de débitos e créditos, evitando fraudes e dupla-despesa (*double-spending problem*). O objetivo era obter um sistema eletrônico de pagamentos baseado não em confiança (mútua ou em terceiros), mas em provas criptográficas, permitindo a livre e direta circulação da moeda virtual-criptográfica (*cryptocurrency*). A *blockchain* (cadeia de blocos) foi o mecanismo proposto por Nakamoto (2008) para viabilizar a circulação da primeira moeda digital: o *Bitcoin*.

A *blockchain* é uma “cadeia de blocos” que constitui uma espécie de base de dados com o histórico cronológico do registro de todas as transações efetuadas, tal qual um livro-razão contábil distribuído entre todos os membros da rede (*distributed ledger*). As transações são autorizadas por meio de assinaturas digitais criptográficas e agrupadas, a cada intervalo de tempo (por exemplo, dez minutos), em blocos.

Os blocos são numerados a partir da combinação de dados de todas as transações ocorridas no decurso do intervalo de tempo pré-estabelecido, recebendo um selo temporal único (*timestamp*). A numeração (*hash*) dos blocos depende não apenas das informações específicas das transações realizadas, como também da numeração do bloco imediatamente anterior, tornando todos os blocos elos de uma só cadeia (EVRY, 2015).

Os registros na *blockchain* podem ser acessados por chaves (assinaturas) públicas, mas só podem ser alterados por chaves privadas. As chaves criptográficas permitem a visualização dos registros e a execução das transações (transferências entre as partes), mas não evitam o problema da dupla-despesa. A solução tradicional seria a instituição de uma autoridade central que garantisse a correta contabilidade de débitos e créditos, verificando todas as transações e atestando os saldos líquidos. A verificação pela autoridade central se traduziria em “cunhagem de moeda certificada”, apta a ser utilizada para novas transações. Nesta solução, o que evita a dupla (ou múltipla) despesa dos saldos é a gestão centralizada, que enxerga todas as transações em ordem cronológica. Para que a transação seja validada em um modelo não-centralizado, que prescindia de uma autoridade central mediadora, todas as transações devem ser anunciadas publicamente e os participantes devem concordar em uma única história sobre a ordem em que foram realizadas, impossibilitando que uma mesma moeda (ou saldo) seja utilizada em mais de uma transação pelo seu detentor. Este é o objetivo da *blockchain*: garantir transparência e autenticidade às transações, validando a posse e a transferência dos saldos mediante consenso entre todos os participantes.

O consenso entre os participantes é o princípio fundamental da *blockchain*, o que a diferencia de uma simples base de dados. O consenso é alcançado a partir de verificação descentralizada, realizada independentemente, simultânea e automaticamente pelos diversos nós de verificação que compõem a rede. O consenso desenvolvido por Nakamoto (2008) para o *Bitcoin* é baseado no conceito de prova-de-trabalho (*proof-of-work*). Os nós de verificação se traduzem em servidores computacionais, diretamente interligados, que geram os selos temporais únicos correspondentes a cada bloco de informação (*peer-to-peer distributed timestamp server*). O trabalho está em obter, simultaneamente, a numeração correta de cada bloco a partir das transações realizadas. Como as informações agrupadas em cada bloco correspondem a uma única numeração possível, a versão correta dos blocos é identificada por meio do consenso quanto a sua numeração pela maioria dos verificadores. Qualquer alteração indevida em alguma informação do bloco resulta em numeração divergente, incompatível com a numeração correta atestada pela maioria, invalidando o registro da transação. A versão validada pela maioria dos nós de verificação é adicionada à

cadeia de blocos verificados – estendendo o consenso quanto ao histórico cronológico de todas as transações realizadas – e, só então, a transação é efetiva e automaticamente efetuada entre as partes contratantes.

Não se pode alterar um bloco armazenado, com as respectivas transações validadas, sem se refazer todo o trabalho de verificação distribuída e a validação consensual entre os nós verificadores. Como todos os blocos estão interligados entre si, a alteração de um bloco implica, necessariamente, na alteração de todos os blocos subsequentes. Alterar uma transação já validada implica, então, em mudar toda a história posterior. Nakamoto (2008) demonstra que a probabilidade de um ataque para modificar uma transação armazenada, e toda a história subsequente, diminui exponencialmente com a expansão da cadeia.

A dificuldade em alterar as transações já validadas e armazenadas na *blockchain* não deve ser interpretada como desvantagem, pois constitui uma das motivações da moeda virtual. Uma das justificativas para o *Bitcoin*, apresentada por Nakamoto (2008), é justamente a obtenção de um sistema de pagamentos irreversível para fazer frente a transações de bens e serviços irreversíveis.

A segurança do sistema também depende que “nós honestos”, atuando independentemente, controlem mais poder de processamento de verificação do que “nós desonestos” em cooperação para atacar a rede. O trabalho de verificação depende de tempo e poder de processamento, portanto, consome tempo e energia (eletricidade). Por convenção, a *blockchain* estabelecida para suportar a circulação da moeda virtual *Bitcoin* remunera o trabalho de verificação por meio da emissão de novos *Bitcoins*. Por este motivo, os verificadores são conhecidos como “mineradores” (*miners*), obtendo moeda em função do poder de processamento investido. Esta recompensa incentiva a “honestidade” dos mineradores (nós de verificação), pois o poder de processamento necessário para superar a maioria honesta e fraudar a rede, minando o sistema, é superado pelo incentivo de seguir as regras e emitir mais moeda.



Figura 1 – Cotação do *Bitcoin* em dólar

Atualmente, há cerca de 17 milhões de *Bitcoin* em circulação. O valor do *Bitcoin* saltou de mil dólares em janeiro de 2017 para cerca de 20 mil dólares em dezembro, segundo índice de preço publicado pela CoinDesk (Figura 1). Em maio de 2018 a cotação estava em torno de 8 mil dólares, o que corresponde a 136 bilhões de dólares em circulação. O trabalho de consenso distribuído necessário para validar as transações nos blocos é eletro-intensivo – em maio de 2017 consumia cerca de 11,5 TWh ao ano, em maior de 2018 em torno de 67 TWh ao ano, segundo estimativas da *Digiconomist*. As “fazendas” de mineração de *Bitcoin* se concentram na China (MIT, 2017), mas com o aumento de transações e consumo de energia, novos centros com preços de energia mais baixos tornam-se atrativos, como Quebec¹.

Entretanto, pode-se questionar se as “moedas virtuais” – o *Bitcoin* e todas as demais moedas digitais que surgiram desde então² – se constituem moeda de fato, tendo em vista a elevada oscilação do seu valor face às “moedas reais”³. A cotação do *Bitcoin* em dólar nos últimos anos atesta a ausência da função de reserva de valor da “moeda virtual”, sugerindo que a retenção de *Bitcoin* no portfólio mais se aproxima aos riscos e retornos próprios de ativos do que à segurança e liquidez oferecidas pelas “moedas reais”. Para além desta discussão, resta evidente que a *blockchain* propiciou, sem a presença de uma autoridade central garantidora da confiabilidade do sistema, a circulação de moedas digitais com plena função de meio (eletrônico) de pagamentos.

3. DO BITCOIN PARA O MUNDO: A REVOLUÇÃO DA BLOCKCHAIN

A circulação das moedas digitais é, em geral, encoberta por ceticismo e resistência – seja pelo temor das autoridades centrais frente à perda de controle de suas funções; pelo receio dos intermediários financeiros face à redução de seus mercados “cativos”; pela descrença dos potenciais beneficiários quanto à confiabilidade do sistema; pelo próprio desconhecimento da tecnologia; ou pela comum associação a prática de transações ilegais, favorecidas pela ausência de regulação e controle centralizados.

1 MILES, K. (2018). Bitcoin is eating Quebec. MIT Technology Review, 11/04/2018.

2 Há inúmeras cripto-moedas em circulação atualmente, mas apenas cinco superam 10 bilhões de dólares em circulação (*Bitcoin*, *Ethereum*, *Ripple*, *BitcoinCash* e *EOS*) em maio de 2018, segundo dados da Coin Market Cap (www.coinmarketcap.com).

3 Para uma análise exploratória sobre o peso dos possíveis determinantes (tecnológicos e econômicos) da taxa de câmbio entre o *Bitcoin* e o dólar, conferir LI & WANG (2017).

Entretanto, pouco a pouco, a atenção foi se deslocando do receio às moedas digitais às potencialidades latentes da tecnologia da *blockchain*¹. Um mecanismo que assegura transparência e autenticidade às transações, validando a propriedade e a sua transferência mediante consenso entre os participantes, pode ser empregado, em tese, para qualquer “ativo digitalizável”, isto é, para toda sorte de transações com representação digital de ativos físicos. Este poderoso *insight* abriu um leque de novas possibilidades de aplicação da *blockchain* em vários setores e indústrias. Os entusiastas da tecnologia defendem que o seu transbordamento para a economia com um todo representará uma revolução para os negócios análoga ao que a internet propiciou para as comunicações (UK, 2016; PwC, 2016; MIT, 2017).

A *blockchain* pode ser aberta a qualquer interessado (*unpermissioned ledger*) ou restrita a determinados participantes (*permissioned ledger*), enquanto que o acesso aos registros pode ser aberto a todos os participantes (*public ledger*) ou limitado a determinados usuários (*private ledgers*)². Há ainda outras formas de consenso entre os participantes, mais simplificadas do que a desenvolvida para o *Bitcoin*, tornando o processo de validação mais ágil e menos oneroso – como a prova-de-participação (*proof-of-stake*), cujo processo de verificação é alocado entre os participantes em função da participação relativa dos ativos (Sikorski et al., 2017).

A possibilidade de condicionar a realização automática das transações à verificação de regras pré-estabelecidas permite ainda que a *blockchain* seja estruturada como tecnologia capaz de operacionalizar “contratos inteligentes” (*smart contracts*), que sujeitam a realização de transações à validação de determinadas condições, favorecendo o cumprimento (*enforcement*) de cláusulas contratuais estabelecidas entre as partes (*compliance*).

Desta forma, pode-se ajustar a tecnologia para inúmeros fins e contextos, com maior ou menor grau de descentralização, ampliando as possibilidades de aplicação, que vão desde a autenticação e gerenciamento da identidade digital dos agentes (indivíduos e empresas) e de suas informações privadas à comprovação da propriedade, posse ou proveniência de ativos. As aplicações distribuídas (*distributed applications*) podem ser estruturadas em plataformas (*blockchain*) próprias (como o *Bitcoin*) ou podem utilizar plataformas descentralizadas de terceiros que ofertam o serviço de *blockchain* e *smart contracts* para outras aplicações (como o *Ethereum*).

¹ Para um retrato desta tendência, conferir análise da *The Economist* em “The Trust Machine – The technology behind Bitcoin could transform how the economy works”, 31/10/2015.

² Ainda não há nomenclaturas e definições consensuais sobre os diversos termos e conceitos que envolvem a tecnologia em desenvolvimento. O artigo guiou-se principalmente pelas definições, não totalmente compatíveis, apresentadas em UK (2016), PwC (2016) e Sikorski et al. (2017).

Embora ainda prevaleçam muitas incertezas acerca da segurança e dos desdobramentos efetivos da *blockchain*, propagada como panaceia para todos os problemas atuais, o seu potencial disruptivo é inegável¹. Ainda que em estágio inicial ou experimental, já há aplicações distribuídas para gerenciamento de histórico médico individual, registro de terras, transferência direta de benefícios governamentais, comercialização de ouro, proveniência de diamantes, procedência de roupas, entre outros (UK, 2016; PwC, 2016).

As próprias instituições financeiras já enxergam a tecnologia como fonte crucial de redução de custos pelo compartilhamento conjunto de dados, reduzindo gastos com replicação e compatibilização de registros e sistemas. A construção de *blockchain* privadas pode facilitar a transferência de informações em escala global, automatizando processos de modo mais eficiente e rápido. Nesta configuração, pode-se ainda manter uma autoridade central definindo regras e verificando as transações, com poder para reverter transações já realizadas e validadas. A Nasdaq já utiliza uma plataforma (LINQ) construída sob uma *blockchain* privada para agrupar e armazenar informações das ações comercializadas.

No entanto, o poder disruptivo da *blockchain* não está na redução de custos em modelos de negócios tradicionais, mas na possibilidade de estruturar transações confiáveis em novas plataformas (distribuídas ou descentralizadas) em contexto de importância crescente da Internet das Coisas (IoT – *Internet of Things*) e da economia compartilhada (*sharing economy*). A IoT vislumbra elevada conectividade de todos os aparelhos e dispositivos utilizados no dia-dia, gerando um fluxo constante de informações e permitindo controle remoto e coordenado para um funcionamento mais eficiente (HUCKLE et al., 2016). A economia compartilhada baseia-se no compartilhamento de ativos com capacidade ociosa, geralmente por meio de transações diretas entre partes contratantes desconhecidas (FRENKEN & SCHOR, 2017).

Huckle et al. (2016) vislumbram grande potencial em integrar a tecnologia da *blockchain* à arquitetura da IoT, uma vez que a validação e o armazenamento cronológico das transações efetuadas (estruturadas em *smart contracts*) podem favorecer a transferência e o compartilhamento de ativos entre usuários desconhecidos.

As transações nas plataformas digitais reduzem custos de transação não apenas por facilitar a procura, a formatação dos contratos e o pagamento por via eletrônica, mas principalmente por reduzir assimetrias de informação entre as partes. Como observam Frenken & Schor (2017), as novas plataformas digitais se constituem em novos

¹ Para uma discussão mais detalhada sobre os riscos da tecnologia, conferir Emin Gün Sirer em MIT (2017). Para uma visão mais crítica sobre os potenciais efetivos da *blockchain*, conferir artigo de Alex Hern "Blockchain: the answer to life, the universe and everything?", The Guardian, 7/7/2016.

geradores de confiança, que é construída sob o histórico armazenado das transações passadas (*ratings*), a identidade digital e a sua reputação associada.

A comprovação e a “portabilidade” da reputação dos agentes entre as diversas plataformas reduzem assimetrias de informação e, conseqüentemente, custos de transação. Neste novo contexto, Bostman (2016) defende que a real revolução em curso não está nas tecnologias digitais em si, mas na mudança da formação da confiança entre os agentes. Com as plataformas digitais, a confiança não é mais depositada em salvaguardas tradicionais e autoridades centrais fiadoras, mas construída em camadas, de modo que as pessoas acreditam primeiro nas ideias e serviços ofertados; em seguida, nas plataformas utilizadas como interface para as transações; e, finalmente, nos demais usuários (desconhecidos) contratantes. A utilização crescente de diversas aplicações nesse novo contexto descentralizado aumenta a disposição dos agentes a se engajarem em novas ideias, criando um campo fértil para novos modelos de negócios.

4. IMPLICAÇÕES PARA O SETOR ELÉTRICO

4.1. Sistemas elétricos em transformação e o papel estratégico das redes

Os sistemas elétricos se encontram em profunda transformação. A difusão da geração distribuída, principalmente da solar fotovoltaica, e a propagação de novas tecnologias e aplicações como carros elétricos e armazenamento de eletricidade, despontam como soluções para descarbonização dos sistemas, contestam a centralização da rede unidirecional e posicionam os consumidores, antes passivos e coadjuvantes, em protagonistas polivalentes.

Estruturados em torno de cadeia verticalmente integrada – com transmissão e distribuição interligando a geração centralizada ao consumidor passivo final –, os sistemas elétricos assistem a proliferação de recursos de energia distribuídos (*distributed energy resources* – DER). Definidos como recursos instalados nos sistemas de distribuição (não necessariamente atrás dos medidores) capazes de prover serviços de eletricidade, os DER abrangem desde plantas de geração, resposta e gestão da demanda e armazenamento de eletricidade a veículos elétricos, dispositivos de controle, medidores e aparelhos inteligentes. Embora alguns desses recursos não provejam essencialmente eletricidade, tornam-se DER frente à possibilidade de gestão da carga de modo remoto, autônomo e instantâneo, propiciada pelo desenvolvimento de tecnologias de informação e comunicação que transformam bens de consumo em serviços (PEREZ-ARRIAGA et al., 2016).

A integração aos sistemas centralizados atuais dos DER e dos novos *prosumers* (consumidor-produtor) ou mesmo *prosumages* (consumidor-produtor-armazenador) é um dos principais desafios da indústria. Ao mesmo tempo em que a evolução do sistema é determinada pela penetração das novas tecnologias e atores, as rotas de expansão determinam as possibilidades e os graus de integração.

Nesse horizonte, com a redução significativa de custos dos painéis solares e a perspectiva de armazenamento distribuído em escala comercial, a rota *off-grid* acena para a emancipação da rede, prometendo autonomia e autossuficiência. Paralelamente à rota *off-grid*, pode-se vislumbrar outros caminhos de expansão com maior ou menor grau de descentralização e interdependência.

Hojcková et al. (2018) vislumbram três cenários de transição distintos para sistemas completamente renováveis, com diferentes níveis de interconectividade entre os agentes: sistemas com consumidores dependentes (*super-grid*), interdependentes (*smart-grid*) ou independentes (*off-grid*). O cenário *super-grid* corresponde às características atuais, permanecendo a geração significativamente centralizada, ainda que renovável. No cenário *smart-grid*, o sistema seria composto principalmente por *prosumers* interconectados, abrindo espaço para elevada interação. Já no cenário *off-grid*, o armazenamento de eletricidade distribuído tornaria o desligamento da rede atrativo, em processo conhecido por “espiral da morte” (FELDER & ATHAWALE, 2014), quando o custo da rede aumenta diretamente com a taxa de abandono, reforçando a saída.

A rota *off-grid* pode prevalecer em contexto de sistemas precários ou mesmo inexistentes, constituindo-se não como solução provisória enquanto a rede não chega, mas permanente, como solução de longo prazo reconhecida e adequada (GUI & MACGILL, 2018). Já em contextos de sistemas elétricos desenvolvidos, o apelo da rota *off-grid* em geral está associado a (supostos) benefícios decorrentes do “empoderamento” dos consumidores, da descabornização por iniciativa própria e da autossuficiência. Porém, face à emergência de recursos distribuídos e de todas as vantagens que a interconectividade traz aos usuários, o cenário de *prosumages* autônomos e independentes perde sentido mesmo para comunidades isoladas.

Investigando a “era dos *prosumers*”, Parag & Sovacool (2016) ponderam que a trajetória *off-grid* com agentes desconectados e autossuficientes deve permanecer restrita. As novas tecnologias e aplicações acenam para a interdependência das redes inteligentes, pela multiplicidade de serviços e utilidades que a interconectividade possibilita – com complementariedades e sinergias, e respectivos ganhos de escopo e rede, ampliando a eficiência das aplicações por meio de controles inteligentes e reações instantâneas aos sinais de preço.

A integração dos DER direciona as trajetórias de expansão para soluções com maior grau de descentralização, porém as rotas não implicam necessariamente em distribuição completa de recursos e independência de agentes. Pelo contrário, dificilmente o cenário com maior conectividade e complexidade que se avizinha prescindirá dos ganhos sistêmicos das redes preexistentes, ainda que demande adaptações dos sistemas e transformações das estruturas físicas e virtuais de coordenação.

Sob esta perspectiva, a dicotomia entre geração centralizada e distribuída pode ser superada por novas estruturas que integrem micro-redes (*microgrids*) à atual rede centralizada, incorporando as novas tecnologias sem prescindir dos ativos existentes e das vantagens que a sua estrutura pode gerar para maior e melhor conectividade física e virtual entre os agentes e os recursos.

O desenvolvimento de micro-redes (*microgrids*) se apresenta como solução promissora para integrar os DER à estrutura atual centralizada e unidirecional. Concebidas no final dos anos 90, as micro-redes são estruturadas para administrar e integrar recursos (distribuídos) nas redes de distribuição de modo a maximizar a confiabilidade e a resiliência do sistema frente a interrupções originadas por desastres naturais, ataques físicos ou cibernéticos e falhas em cascata. A sua arquitetura permite administrar oferta e demanda de energia localmente em subseções da rede que podem ser isoladas automaticamente da rede principal, garantindo a provisão de serviços essenciais (HIRSCH et al., 2018).

Desta forma, ao invés de coordenar recursos distribuídos individualmente, pode-se agregá-los em micro-redes, que emergem nos sistemas de distribuição como fontes (de consumo, geração ou armazenamento) capazes de impactar a carga residual de modo automático e instantâneo, respondendo a sinais de preço. Neste contexto, pode-se instituir diferentes âmbitos de mercados (PARAG & SOVACOOOL, 2016), englobando apenas as micro-redes ou toda a rede de distribuição, ou ainda segmentando os agentes em mercados específicos (por exemplo, baixo ou médio-alta voltagem).

A instituição de mercados locais pode alterar a lógica e gestão atual das novas “aplicações inteligentes”, especialmente das construções, que tendem a se estruturar em módulos “autossuficientes”. A noção de autonomia no consumo de eletricidade se apoia geralmente no sistema centralizado de energia para balancear a demanda. Como observa McKenna (2018), o conceito de autonomia restringe-se, em geral, a horizontes temporais estendidos (anuais) e apenas a eletricidade, sem englobar, por exemplo, serviços ancilares (frequência e voltagem) e demanda por flexibilidade (Romeiro & Ferraz, 2016). Em contexto de micro-redes integradas, a interconectividade pode reduzir os incentivos a soluções autônomas e propiciar maior especialização

que responda à vocação de agentes e recursos, com ganhos positivos de escala.

4.2. Potencialidades da *blockchain* em novos sistemas elétricos com elevada interconectividade de recursos e agentes

A atmosfera atual, como discutido na terceira seção, é propícia para o desenvolvimento de novos modelos de negócios. Arranjos estruturados sob *blockchain*, IoT e compartilhamento de ativos podem favorecer soluções descentralizadas e distribuídas, impulsionando a penetração e integração de DER.

Em um primeiro plano, a *blockchain* pode conferir maior transparência da propriedade dos ativos, facilitando a comercialização e o seu compartilhamento entre diversos proprietários¹. Para solar fotovoltaico, por exemplo, pode facilitar a comercialização via *leasing* e o seu compartilhamento, favorecendo a geração distribuída em condomínios e comunidades. A redução de custos de transação no compartilhamento de ativos pode direcionar a indústria para soluções mais integradas e compartilhadas, tirando proveito da infraestrutura preexistente herdada do atual contexto de centralização. Nesta perspectiva, a incorporação de baterias para armazenamento pode desenvolver-se em nível descentralizado e não necessariamente distribuído, com ganhos significativos de escala (LOMBARDI & SCHWABE, 2017).

Em um segundo plano, a *blockchain* pode facilitar o gerenciamento mais eficiente e transparente dos novos fluxos multidirecionais que surgem com a proliferação dos *prosumers* ou *prosumages* nas redes de distribuição, possivelmente estruturados em torno de micro-redes. Com a instalação de infraestrutura de medição inteligente (*smart meters*) e de aparelhos e dispositivos conectados (IoT), o consumo instantâneo de eletricidade torna-se mais reativo às variações da oferta, incorporando efetivamente o imprescindível gerenciamento da demanda na nova equação de consumo-suprimento. A *blockchain* pode ser uma importante aliada na definição de preferências de consumo e geração dos *prosumers*, operacionalizando regras pré-estabelecidas em função de variação de preço, hora, fluxo e estoque de energia (via *smart contracts*).

O gerenciamento da identidade digital dos usuários e o histórico do registro de todas as suas transações (fluxos) pode ainda viabilizar o problema da recarga de veículos elétricos e mesmo o seu compartilhamento, alterando por completo o modelo de negócio atual da indústria automobilística. A *blockchain* pode favorecer e acelerar a

¹ É digno de nota, neste sentido, a inclusão da “geração compartilhada” na Resolução nº 482/2012 da ANEEL, que estabelece as condições para acesso de microgeração (potência instalada menor ou igual a 75 kW) e minigeração (potência entre 75kW e 5 MW) distribuída aos sistemas de distribuição.

massificação da eletrificação do transporte, tornando-a estratégica para armazenar o excesso de oferta variável de energia renovável (NEWBERY, 2018).

A integração e automação de todos esses processos, serviços e produtos – ofertados, gerenciados e utilizados por múltiplos agentes –, pode tornar realidade com a conjugação de *blockchain*, contratos inteligentes e plataformas digitais. Já existem algumas experiências nesse sentido (PwC, 2016).

Em Nova York, o projeto piloto da Brooklyn Microgrid estruturou uma micro-rede (*microgrid*) física e virtual na qual consumidores e *prosumers* interconectados podem comercializar energia entre si diretamente (*peer-to-peer*) por meio de uma *blockchain* privada. A micro-rede física ainda não possui autossuficiência, mas garante suprimento a consumidores prioritários (como hospitais) em casos emergenciais de interrupção da rede da distribuidora, isolando a micro-rede da rede da distribuidora. A comercialização de energia ainda não determina os fluxos efetivos dentro da micro-rede, cujo consumo é suprido pela rede da distribuidora local. Assim, a comercialização via *blockchain* entre os participantes da micro-rede da Brooklyn Microgrid se traduz em comercialização de saldos de energia (basicamente solar) entre vizinhos interligados via *blockchain*, incentivando a produção distribuída local de energia renovável (MENGELKAMP et al., 2018).

Em Perth, na Austrália, onde 25% das casas já possuem painéis fotovoltaicos, a *start-up* PowerLedger também permite a comercialização do excesso de energia solar com outros consumidores. A criação de um mercado de varejo para a geração distribuída, superando a relação restrita entre consumidor-distribuidora, não se restringe a experiências marginais desenvolvidas por *start-ups* inovadoras. A *utility* europeia Vattenfall apostou na plataforma Powerpeers para comercialização direta entre usuários, que podem escolher de quem comprar e para quem vender a sua energia distribuída. Desta forma, a descentralização em curso não afasta necessariamente as *utilities* dos novos arranjos, mas a sua sobrevivência dependerá da capacidade de inovação e adaptação ao novo contexto (GREEN & NEWMAN, 2017).

Há também exemplos de aplicação para transação de certificados de energia renovável e de emissões, garantindo a procedência dos créditos e a autenticação das transações via *blockchain*. A Nasdaq, por meio da plataforma LINQ, já disponibiliza o serviço (PwC, 2016; GOMES et al., 2017).

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O espectro da rota *off-grid* paira sob o setor face à perspectiva de inovações tecnológicas disruptivas para armazenamento distribuído.

Porém, as potencialidades das redes inteligentes sugerem que a interconectividade física e virtual dos agentes superará incentivos à desconexão e autonomia – possuir recursos distribuídos e desconectados da rede seria análogo a ter dispositivos eletrônicos sem internet. Neste horizonte, os ativos atuais deixariam de ser abandonados em processo de “espiral da morte”, tornando-se ativos extremamente estratégicos.

As novas interfaces interligadas-compartilhadas podem solucionar os entraves atuais relacionados à incompatibilidade entre a estrutura atual centralizada e o caráter descentralizado das novas tecnologias e aplicações. Neste contexto, a tecnologia da *blockchain* pode alavancar novos modelos de negócio, (i) tornando viável a operação física e virtual de novas plataformas e redes; (ii) propiciando a penetração de recursos distribuídos, possivelmente estruturados em micro-redes; e (iii) estabelecendo mercados próprios que remunerem adequadamente todos os serviços e sinalizem aos agentes a alocação de recursos no sistema em expansão.

Com todos os ganhos que se anunciam pela integração, conectividade e compartilhamento entre todos os elos e agentes da cadeia, o gerenciamento das diferentes possibilidades e combinações de oferta, consumo e armazenamento pode tornar a rota *off-grid* uma ficção científica ultrapassada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BOTSMAN, R. New Trust Networks: your best friend is a stranger. WIRED, 2016.

EVRY. Blockchain: Powering the Internet of Value. White Paper EVRY Financial Services, 2015.

FELDER, F.; ATHAWALE, R. The Life and Death of the Utility Death Spiral. The Electricity Journal, Vol. 27, Issue 6, p. 9-16, 2014.

FRENKEN, K.; SCHOR, J. Putting the sharing economy into perspective. Environmental Innovation and Societal Transitions, 23: 3-10, 2017.

GOMES, L. L.; SILVA, P. V.; CARVALHO, L. F. Um Novo Mecanismo de Negociação de Certificados Brasileiros de Energia Renovável e Crédito de Carbono via Blockchain. Trabalho apresentado no VI ELAEE (Encontro Latino-Americano da Economia da Energia), 2017.

GREEN, J.; NEWMAN, P. Citizen Utilities: The emerging power paradigm. Energy Policy, 105: 283-293, 2017.

GREEN, R.; STAFFELL, I. “Prosumage” and the British Electricity Market. Economics of Energy & Environmental Policy, Vol. 6, No. 1, 2017.

GUI, E.; MACGILL, I. Typology of future clean energy communities: An exploratory structure, opportunities, and challenges. *Energy Research & Social Science*, 35: 94-107, 2018.

HIRSCH, A.; PARAG, Y.; GUERRERO, J. Microgrids: A review of technologies, key drivers, and outstanding issues. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 90: 402-411, 2018.

HOJCKOVÁ, K.; SANDÉM, B.; AHLBORG, H. Three electricity futures: Monitoring the emergence of alternative system architectures. *Futures*, 98: 72-89, 2018.

HUCKLE, S.; BHATTACHARYA, R.; WHITE, M.; BELOFF, N. Internet of Things, Blockchain and Shared Economy Applications. *Procedia Computer Science*, 98: 461-466, 2016.

LI, X.; WANG, C. A. The technology and economic determinants of cryptocurrency exchange rates: The case of Bitcoin. *Decision Support Systems*, 95: 49-60, 2017.

LOMBARDI, P.; SCHWABE, F. Sharing economy as a new business model for energy storage systems. *Applied Energy*, 188: 485-496, 2017.

MENGELKAMP, E.; GÄRTTNER, J.; ROCK, K.; KESSLER, S.; ORSINI, L.; WEINHARDT, C. Designing microgrid energy markets: A case study: The Brooklyn Microgrid. *Applied Energy*, 210: 870-880, 2018.

MIT. The Business of Blockchain: Unlocking the Potential. Conference of MIT Technology Review & MIT Media Lab. Disponível em: <<http://events.technologyreview.com/video/?event=business-of-blockchain&year=2017>>. 2017.

MUNSON, R. From Edison to Enron: The Business of Power and What It Means for the Future of Electricity. Praeger, 2005.

NAKAMOTO, S. Bitcoin: A Peer-to-Peer Electronic Cash System, 2008.

NEWBERY, D. Shifting demand and supply over time and space to manage intermittent generation: the economics of electrical storage. *Energy Policy*, 113: 711-720, 2018.

PARAG, Y.; SOVACOOOL, B. Electricity market design for the prosumer era. Perspective, Nature Energy, 2016.

PÉREZ-ARRIAGA, I. J. et al. Utility of the Future – An MIT Energy Initiative response to an industry in transition. MIT/Comillas, 2016.

PwC. Blockchain – an opportunity for energy producers and consumers? PwC global power & utilities, 2016.

ROMEIRO, D.; FERRAZ, C. O Protagonismo das Novas Energias Renováveis e o Desafio de Remunerar a Maior Flexibilidade Exigida aos Sistemas Elétricos. Revista Brasileira de Energia, v. 22, p. 66-81, 2016.

SIKORSKI, J.; HAUGHTON, J.; KRAFT, M. Blockchain Technology in the Chemical Industry: Machine-to-machine electricity market. Applied Energy, 195: 234-246, 2017.

UK. Distributed Ledger Technology: beyond block chain. UK Government Chief Scientific Adviser, 2016.

