



TENDÊNCIAS PARA SISTEMAS MICROGRIDS EM CIDADES INTELIGENTES: UMA VISÃO SOBRE A BLOCKCHAIN

Yuri B. Gabrich¹, Igor M. Coelho^{1,2}, Vitor N. Coelho^{2,3}

¹ Instituto de Matemática e Estatística, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil

² Grupo da Causa Humana, Ouro Preto, MG, Brasil

³ Instituto de Computação, Universidade Federal Fluminense, Niterói, RJ, Brasil

*yuribgabrich@gmail.com, igor.machado@ime.uerj.br,
vncoelho@gmail.com

RESUMO

A constante evolução das cidades tem impulsionado o desenvolvimento de novas atividades econômicas e vem modificando mercados consolidados, inclusive a energia elétrica. O advento de novas tecnologias para produção de energia alternativa em pequena e média escala permitiu aos consumidores a capacidade de produzir e armazenar energia. Porém mesmo com a viabilidade de reverter à distribuidora esta geração como créditos de energia, o mercado ainda não permite relações cliente-cliente. Embora o setor elétrico brasileiro tenha função estratégica nas políticas públicas atuais, ainda considera-se alguns setores como monopólios naturais. As tecnologias de *blockchain* tornam possível o armazenamento e gerenciamento seguro de informações em ambientes radicalmente distribuídos, sem necessidade de uma autoridade de controle centralizada. O objetivo deste trabalho é levantar o estado-da-arte de aplicações de *blockchain* no mercado de energia elétrica, apresentando como a infraestrutura de geração distribuída pode ser usada para se comercializar energia.

PALAVRAS CHAVE. Blockchain, Microgrid, Cidades Inteligentes.

EN - PO na Área de Energia

ABSTRACT

The constant evolution of cities has driven the development of new business models and has been changing consolidated markets, including energy power. The advent of new technologies for small and medium-scale alternative power generation has enabled consumers to produce and store energy. However, even with the feasibility to get energy credits by reverting the generation to the electric utility, the energy market still does not allow P2P business. Although the Brazilian electricity sector has a strategic role in current public policies, some sectors are still considered as natural monopolies. With blockchain technologies is possible to securely store and manage information in radically distributed environments without a centralized control authority as usual. The objective of this work is to achieve the state of the art of blockchain applications in the electricity market, presenting how the distributed generation infrastructure can be used to commercialize energy.

KEYWORDS. Blockchain, Microgrid, Smart Cities.

EN - OR in Energy



1. Introdução

A comercialização de Energia Elétrica (EE) ocupa função estratégica no atual modelo setorial brasileiro [CCEE, 2017d]. Esta afirmação é uma das bases que guiam as diretrizes que vem sendo aperfeiçoadas ao longo dos anos no mercado de EE. Podemos citar o Projeto de Reestruturação do Setor Elétrico Brasileiro (Projeto RE-SEB), desenvolvido entre 1996 e 1998, como um marco na história e que teve como principais conclusões a necessidade de desverticalização das empresas de EE; o incentivo a competição na geração e comercialização; e a continuidade de regulação dos setores de distribuição e transmissão de EE, considerados como monopólios naturais pelo Estado brasileiro [CCEE, 2017d].

A cada instante surgem novas propostas de se fazer as mesmas coisas de formas diferentes, de se criar oportunidades que visem agregar a participação das minorias e de se alterar o *status quo* do mercado. Com a EE não será diferente, mesmo sendo uma área tão conservadora e um sistema que impede rápidas e complexas mudanças. O sistema elétrico vem sendo considerado a maior e mais complexa máquina já construída [Gellings, 2009]. As transformações já são discutidas em vários lugares no mundo, baseados nas oportunidades advindas com o desenvolvimento da tecnologia, principalmente, no contexto das redes de pequeno porte, do inglês *microgrid* [Jiayi et al., 2008].

Uma dessas novas abordagens tecnológicas, o *blockchain*, tem o potencial para mudar radicalmente nossa interação com qualquer tipo de instituição, como ressaltado por Lemos [2017]: “desde governos até casamentos”. O *blockchain* nada mais é do que um banco de dados ou registro (do inglês *ledger*), público e distribuído, surgindo no contexto da criptomoeda Bitcoin para o armazenamento de transações monetárias. De acordo com Lemos [2017], uma das razões para se entusiasmar com as tecnologias baseadas na *blockchain* é que elas são relativamente baratas, oferecendo uma oportunidade de inovação real, não só no campo do setor privado, como vem acontecendo até agora, mas no setor público. Ela é uma ferramenta perfeita para todo e qualquer empreendedor social interessado em mudar para melhor o Brasil [Lemos, 2017].

De acordo com a ANEEL [2016b], o Serviço Energia Elétrica é essencial no dia a dia da sociedade, seja nas residências ou nos diversos segmentos da economia, mas para o uso desse bem é necessária a aplicação de tarifas que remunerem o serviço de forma adequada, que viabilize a estrutura para manter o serviço com qualidade e que crie incentivos para eficiência. Quando cenários comunitários são colocadas em pauta (tais como condomínios fechados, comunidades isoladas e cidades privadas), surge a possibilidade de utilizar a energia elétrica excedente para distintos propósitos Coelho et al. [2016b], além da busca em maximizar o lucro monetário. Com as tecnologias de Geração Distribuída (GD) surgem novos problemas como a otimização da geração em pequenas comunidades auto-sustentáveis, levando em conta custos de geração e distribuição de energia, bem como balanceamento da rede [Coelho et al., 2016a]. Unindo estas tecnologias ao armazenamento de dados via *blockchain* é possível assegurar transações confiáveis de compra/venda/doação de energia entre membros de uma comunidade, condomínio, bairro, ou até países diferentes. Estas transações tem potencial de democratizar o acesso à energia elétrica, seja reduzindo tarifas, seja criando um novo mercado à medida que indivíduos possam participar livremente.

Este trabalho, organizado em 5 seções, busca apresentar o cenário brasileiro na comercialização de EE, bem como discutir possíveis aperfeiçoamentos do modelo atual, frente a inovações tecnológicas presentes em nosso tempo. A Seção 2 apresenta o estado-da-arte da comercialização de EE no cenário brasileiro. Na Seção 3 são introduzidos conceitos relacionados à tecnologia emergente de *blockchain*, fundamental para o desenvolvimento de criptomoedas e a execução de contratos inteligentes. A Seção 4 discute propostas inovadoras no contexto da comercialização de EE, incluindo casos de sucesso internacionais. Finalmente, a Seção 5 conclui o trabalho.

2. A Comercialização de Energia Elétrica no Brasil

O setor elétrico brasileiro está estruturado para garantir a segurança do suprimento de EE; promover a inserção social, por meio de programas de universalização do atendimento; e a



modicidade tarifária e de preços [CCEE, 2017d].

Seguindo tais preceitos, fica a cargo da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) - órgão regulador do setor elétrico - desenvolver metodologias de cálculo tarifário para os diversos segmentos, como geração, transmissão, distribuição e comercialização [ANEEL, 2016b]. No entanto, a ANEEL conta com a participação de outros atores neste contexto institucional, como a Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE), responsável por viabilizar as atividades de compra e venda de energia em todo o país; o Comitê de Monitoramento do Setor Elétrico (CMSE), com o objetivo de avaliar permanentemente a segurança do suprimento de EE em âmbito nacional; a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), responsável pelo planejamento do setor elétrico a longo prazo; o Ministério de Minas e Energia (MME), com a outorga do exercício do poder concedente¹; e o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), responsável pela operação das instalações de geração e transmissão no Sistema Interligado Nacional (SIN) [CCEE, 2017d].

Cada instituição tem sua particularidade no cenário atual de EE, porém de forma geral pode-se discutir as transações deste mercado com detalhes mínimos das operações sem comprometer o entendimento do todo. Desta forma, a estrutura de comercialização de EE está dividida nas categorias: geração, transmissão, distribuição e comercialização; e são representados por seus respectivos agentes [CCEE, 2017b]. Além disso, o mercado funciona em dois ambientes de negociação: o Ambiente de Contratação Regulada (ACR), com agentes de geração, agentes de distribuição e consumidores regulados (ou cativos); e o Ambiente de Contratação Livre (ACL), com geradores, distribuidores, agentes de comercialização e consumidores livres [CCEE, 2017a].

A principal diferença entre estes dois ambientes é a figura do consumidor que, dentro de regulações e condições técnicas específicas, tem a possibilidade de negociar o contrato de compra de EE no ACL diretamente com agentes geradores ou comercializadores, enquanto no ACR, os consumidores ficam restritos à oferta de energia pela distribuidora local [CCEE, 2017a]. Estes últimos são os principais atores deste modelo (e nosso foco neste artigo) e estão classificados, de acordo com o registro jurídico de cada um e com as necessidades técnicas demandadas, como: residencial, industrial, comercial, rural e poder público [ANEEL, 2016b].

Outra característica importante neste cenário, visando a modicidade tarifária, são os leilões de EE, que funcionam como instrumento de compra de energia pelas distribuidoras no ACR. Os leilões são realizados pela CCEE, por delegação da ANEEL, e utilizam o critério de menor tarifa, visando a redução do custo de aquisição da EE a ser repassada aos consumidores cativos [CCEE, 2017d].

Ademais, o modelo em vigor exige, nos dois ambientes, a contratação de totalidade da demanda por parte das distribuidoras e dos consumidores livres; nova metodologia de cálculo do lastro² para venda de geração; contratação de usinas hidrelétricas e termelétricas em proporções que assegurem melhor equilíbrio entre garantia e custo de suprimento, bem como o monitoramento permanente da segurança de suprimento [CCEE, 2017d].

Embora o consumo de EE seja razoavelmente previsível levando em conta médias anteriores, o comportamento dos consumidores varia de acordo com a demanda do mercado financeiro, com o clima, com catástrofes naturais, com o desenvolvimento de novas tecnologias e assim por diante. Desta forma, ocorrem diferenças energéticas quanto aos contratos de compra e venda inicialmente acordados, fazendo-se necessário medidas que garantem o acesso e pagamento da EE de forma justa por aqueles que a negociam [CCEE, 2017a]. No Mercado de Curto Prazo (MCP), também conhecido como mercado de diferenças ou *spot*, são contabilizadas e liquidadas essas diferenças entre os montantes gerados, contratados e consumidos. Sendo todos os contratos necessários

¹Poder concedente: a União, o Estado, o Distrito Federal ou o Município, em cuja competência se encontre o serviço público, precedido ou não da execução de obra pública, objeto de concessão ou permissão [BRASIL, 1995].

²O lastro corresponde ao montante de EE necessário para garantir o consumo (no caso de consumidores e distribuidores) ou a venda (no caso de geradores e comercializadores) da EE nas transações comerciais que realizam [Magalhães, 2009].



para o bom funcionamento dessas operações gerenciados na CCEE.

Resumidamente, de acordo com a ABRADDEE [2017b] e a ANEEL [2001], os aspectos fundamentais propostos no Projeto RE-SEB e que caracterizam o Setor Elétrico Brasileiro (SEB) atualmente são: (i) Desverticalização da indústria de energia elétrica, com segregação das atividades de geração, transmissão e distribuição; (ii) Competição para atrair novos investimentos e propiciar modicidade das tarifas, garantido pela coexistência de empresas públicas e privadas; (iii) Planejamento e operação centralizados; (iv) Regulação das atividades de transmissão e distribuição pelo regime de incentivos, ao invés do “custo do serviço”; (v) Necessidade de complementar as atividades de geração através de regulação para empreendimentos antigos e concorrência para empreendimentos novos; (vi) Coexistência de consumidores cativos e livres; (vii) Livres negociações entre geradores, comercializadores e consumidores livres; (viii) Leilões regulados para contratação de energia para as distribuidoras, que fornecem energia aos consumidores cativos; (ix) Preços da energia elétrica (*commodity*) separados dos preços do seu transporte (uso do fio); (x) Preços distintos para cada área de concessão, em substituição à equalização tarifária de outrora; (xi) Mecanismos de regulação contratuais para compartilhamento de ganhos de produtividade nos setores de transmissão e distribuição.

2.1. Aspectos Financeiros no ACR

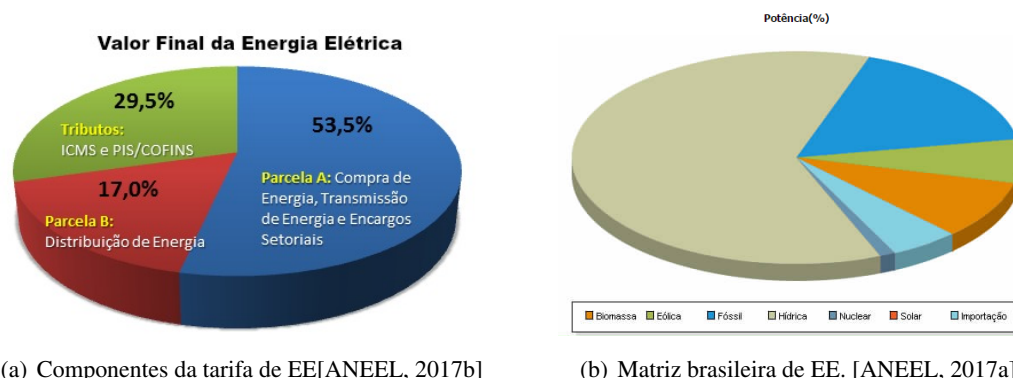
A tarifa de EE, como afirmado pela ANEEL [2017b], visa assegurar aos prestadores dos serviços receita suficiente para cobrir custos operacionais e remunerar investimentos necessários para a expansão da capacidade e garantia do atendimento com qualidade. Os custos e investimentos repassados às tarifas são calculados pelo órgão regulador (ANEEL), e podem ser maiores ou menores do que os custos praticados pelas empresas. Como bem pontuado pela ABRADDEE [2017a], a tarifa é o preço cobrado pela energia consumida (R\$/kWh). Assim, é de se esperar que o preço da EE seja formado pelos custos incorridos desde a geração até a sua disponibilização aos consumidores finais. Além disso, por se tratar de um bem essencial, não se paga somente pelo consumo propriamente dito, mas também pela sua disponibilidade - 24 horas por dia, 7 dias por semana [ABRADDEE, 2017a]. No entanto, a tarifação da EE é estritamente regulada pela ANEEL e, dentro de suas atribuições, busca garantir que as “tarifas remunerem os serviços de forma adequada, que viabilize a estrutura para manter os serviços com qualidade e que crie incentivos para eficiência.” [ANEEL, 2016b].

Desta forma a distribuidora tem custos que devem ser avaliados na definição das tarifas e a conta final que chega ao consumidor, de acordo com a ANEEL [2017b], é dividida em três custos distintos: as Parcelas A e B, e os tributos (vide Figura 1(a)). A *Parcela A* envolve os custos incorridos pela distribuidora relacionados às atividades de geração e transmissão, além de encargos setoriais previstos em legislação específica. Trata-se de custos cujos montantes e preços, em certa medida, escapam à vontade ou gestão da distribuidora. Os itens que a compõe são: Custo de Aquisição de Energia; Custo com Transporte de Energia e Encargos Setoriais. A *Parcela B* representa os custos diretamente gerenciáveis pela distribuidora. São custos próprios da atividade de distribuição que estão sujeitos ao controle ou influência das práticas gerenciais adotadas pela empresa. Estes são compostos por Custos Operacionais, Receitas Irrecuperáveis, Remuneração de Capital e Cota de Depreciação. Além disso, é subtraída da parcela compartilhada de Outras Receitas. Por fim, adicionam-se os Tributos referentes a cobrança pelos Governos Federal, Estadual e Municipal do PIS/COFINS, do ICMS (embora haja discussão em contrário no artigo Por que ICMS?) e da Contribuição para Iluminação Pública, respectivamente.

Conforme se observa na Figura 1(a), os custos da *Parcela A* representam atualmente a maior parte do valor final da tarifa (53,5%), enquanto a *Parcela B*, referente aos custos com distribuição - ou seja, o custo para manter os ativos e operar todo o sistema de distribuição - representa apenas 17% do total [ANEEL, 2017b]. Isto indica que devemos dar mais atenção aos custos de compra e transmissão de EE, a fim de se obter alternativas para diminuir sua parcela.



Os custos atrelados a geração de EE são baseados no preço da disponibilidade da capacidade de geração de cada usina presente no SIN. No entanto, a EPE mostra que, pela abundância de grandes cursos d'água, espalhados por quase todo o território brasileiro, a fonte hidrelétrica está no topo da matriz elétrica brasileira [CCEE, 2017c]. Porém, políticas públicas implementadas nos últimos anos têm feito aumentar a participação de outras fontes nessa matriz, como pode-se observar pelo gráfico da Figura 1(b).



(a) Componentes da tarifa de EE [ANEEL, 2017b]

(b) Matriz brasileira de EE. [ANEEL, 2017a]

Figura 1: Dados do mercado brasileiro

Na matriz energética brasileira, as usinas hidrelétricas apresentam o menor preço para geração de EE. Não só devido a quantidade ofertada, mas, principalmente, pela eficiência de geração se comparado ao custo de instalação e ao “combustível” utilizado. Assim, o ONS define o melhor preço a ser comercializado em certo período e subsistema do SIN, a partir de análises por comportamentos estatísticos da matriz hidrelétrica tanto no presente momento, quanto em cenários futuros [de Oliveira, 2006]. Leva-se em consideração também, a capacidade de transmissão de energia entre cada subsistema e a disponibilidade energética que cada uma oferece em determinada escala de tempo. Por isso, a importância das usinas termelétricas atuando em conjunto neste modelo, mesmo que isso se traduza em um alto custo de geração de EE. Desta forma, simplificando toda a análise, o cálculo do preço da EE varia de seu patamar mais baixo, com custo de geração somente hidrelétrica, ao patamar mais elevado, com geração somente termelétrica. A otimização deste custo garante a modicidade tarifária em todos os subsistemas do SIN e o acesso de forma ininterrupta a EE por todos os cidadãos brasileiros [de Oliveira, 2006].

A fim de tornar mais clara a definição das fontes utilizadas na geração de EE, foi implantado em 2015 o sistema de Bandeiras Tarifárias. Este sistema visa educar o consumidor final sobre a situação do custo da geração de EE em determinado período através da indicação visual por três bandeiras - verde, amarela e vermelha - impressas na conta de energia. O acréscimo financeiro para cada quilowatt-hora (kWh) consumido sobre a tarifa de referência é válido nas situações em que as condições de geração de energia não estão favoráveis [ANEEL, 2017c], ou seja, quando há necessidade de se ligar termelétricas para compensar (ou assegurar futuramente) a geração hidrelétrica.

Outra medida ofertada mais recentemente ao consumidor residencial é a Tarifa Branca. Nela o preço da EE varia conforme o dia e o horário do consumo, desta forma, quando a EE está sendo muito requisitada, o preço é mais alto e vice-versa. O período de alta demanda, geralmente, é entre 18h e 20h, mas deve ser verificado com a concessionária local, ou no site da ANEEL [ANEEL, 2017d]. Este modelo de tarifação já era utilizado por outras classes de consumidores cativos, porém conhecidos por outra terminologia. Conforme explicado pela ANEEL [2017d], “se o consumidor adotar hábitos que priorizem o uso da energia fora do período de ponta (aquele com maior demanda de energia na área de concessão), diminuindo fortemente o consumo neste horário, a opção pela Tarifa Branca oferece a oportunidade de reduzir o valor pago pela energia consumida”.

Deste jeito, mesmo que os custos relacionados ao mercado de EE estejam disponíveis



para consulta pública nos sites das instituições que o operam, as bandeiras tarifárias permitem de forma mais clara ao consumidor final a conscientização do custo do próprio consumo, assim como, a tarifação alternativa oferta ao consumidor um preço de energia menor. Permite também um planejamento de redução de custos através de medidas de eficiência energética ou até da utilização de fontes alternativas de energia em suas unidades de consumo. Esta última opção já se faz presente no Brasil antes das bandeiras tarifárias e é conhecida como Geração Distribuída (GD). A sua implementação e regulação vem se desenvolvendo ao longo dos anos, como discutiremos na subseção seguinte.

2.2. A GD como alternativa aos custos de geração de EE

O modelo tradicional de grandes usinas de EE para atender a necessidade energética de determinada localidade é resultado da facilidade de transporte da eletricidade e seu baixo índice de perdas durante conversões [CCEE, 2017c]. Além disso, por muito tempo as tecnologias vigentes só permitiam esta configuração. No entanto, em um cenário mais contemporâneo, a Geração Distribuída (GD) vem ganhando espaço. Esta geração de EE é caracterizada por ser em menor escala e estar mais próxima dos locais de consumo, e é classificada em microgeração ou minigeração, distinguindo-se de acordo com os requisitos técnicos e definidos em resoluções normativas específicas. De acordo com a ANEEL [2016c], os estímulos à GD se justificam pelos potenciais benefícios que pode proporcionar ao sistema elétrico, como o adiamento de investimentos em expansão dos sistemas de transmissão e distribuição, o baixo impacto ambiental, a redução no carregamento das redes, a minimização das perdas e a diversificação da matriz energética.

Além disso, a GD é outra medida que pode ser utilizada para assegurar um menor custo de EE para o consumidor final. Visto que desde 2012, o consumidor brasileiro pode gerar sua própria EE a partir de fontes renováveis e, inclusive, fornecer o excedente para a rede de distribuição de sua localidade [ANEEL, 2016c]. Desta forma, o proprietário de uma GD não precisa consumir toda a energia produzida no momento da geração, uma vez que ela poderá ser injetada na rede e, nos meses seguintes, receberá créditos em kWh na fatura, que poderão ser compensados pela energia consumida da rede [Instituto IDEAL, 2017]. Esta “manobra” de energia chama-se Sistema de Compensação de EE, ou “autoconsumo remoto”, e é conhecida internacionalmente como *net metering*. Como exemplo, a microgeração por fonte solar fotovoltaica permite que de dia a sobra da energia gerada seja passada para a rede e à noite, a rede devolva a energia para a unidade consumidora e supra necessidades adicionais. Portanto, a rede funciona como uma bateria, armazenando o excedente até o momento em que a unidade consumidora necessite de energia proveniente da distribuidora [ANEEL, 2016c].

Ademais, vale ressaltar outras características desse modelo, como o prazo de validade de 60 meses para os créditos, a possibilidade de usá-los para abater o consumo de unidades consumidoras do mesmo titular situadas em outro local (desde que na área de atendimento de uma mesma distribuidora) [ANEEL, 2016c], a possibilidade de instalação de GD em condomínios (possibilitando que a energia gerada seja repartida entre os condôminos em porcentagens definidas pelos próprios consumidores), e da criação da “geração compartilhada”, podendo-se criar um consórcio ou uma cooperativa a fim de se aproveitar a energia gerada para redução das faturas [ANEEL, 2016c].

Mesmo com todas as vantagens em se ter GD, há um ponto instável nesta configuração, a discrepância na comercialização de energia, pois as diferenças são liquidadas em kWh, não sendo considerado as diferentes bases de cálculo do custo de geração pela distribuidora e pelo sistema de GD. “O Sistema de Compensação de EE é definido como um arranjo no qual a energia ativa injetada por unidade consumidora com GD é cedida, por meio de empréstimo gratuito, à distribuidora local e posteriormente compensada com o consumo de EE ativa” [ANEEL, 2016a].

No entanto, a precificação do custo da EE fornecida pelo consumidor é uma tarefa árdua, pois cada indivíduo tem uma referência de custo diferente. Pois “compete ao consumidor a iniciativa de instalação de GD – a ANEEL não estabelece o custo dos geradores e tampouco eventuais



condições de financiamento. Portanto, o consumidor deve analisar a relação custo/benefício para instalação dos geradores, com base em diversas variáveis: tipo da fonte de energia (painéis solares, turbinas eólicas, geradores a biomassa, etc), tecnologia dos equipamentos, porte da unidade consumidora e da central geradora, localização (rural ou urbana), valor da tarifa à qual a unidade consumidora está submetida, condições de pagamento/financiamento do projeto e existência de outras unidades consumidoras que possam usufruir dos créditos do sistema de compensação de EE” [ANEEL, 2016c].

Ou seja, embora o consumidor possa economizar na tarifa de EE, ele ainda não consegue monetizar com seu investimento. O mercado de GD ainda está restrito ao monopólio do sistema de distribuição de energia, mas poderia se comportar como o mercado de livre comércio que fundamenta o ACL. Talvez um dos maiores problemas, não considerando os fatores técnicos, seja garantir as transações de compra e venda de energia por inúmeras pessoas que não se conhecem e que possuem necessidades energéticas diferentes. Desta forma a tecnologia de *blockchain* pode ser uma solução viável.

Transformar as redes elétricas para suportarem o novo paradigma é apontado como sendo mais custoso do que começar um sistema do zero. Nesse contexto, novas tecnologias que visam essa troca de informações e interações entre distintos agentes autônomos [Coelho et al., 2017], embarcados com ferramentas da inteligência artificial, e mecanismos como a *blockchain*, deverá ser uma tendência para os próximos anos.

3. Blockchain e suas aplicações

De acordo com a Endeavor [2015], os *blockchains* são um sistema de contabilidade, uma maneira de esclarecer e validar um registro, uma transação. Porém, ao contrário de outros sistemas, o registro gerado pelo *blockchain* é distribuído, sendo preservado em milhões de computadores pessoais, bem como em *data warehouses*. Assim, não existe um único dono dos registros e cada instância de *blockchain* possui um total das transações no seu mercado.

Embora esta tecnologia tenha se tornado conhecida como parte do Bitcoin³, é importante ressaltar que os seus componentes não são necessariamente novos, se analisados em separado. Como mencionado por Aleixo [2016], redes distribuídas e criptografia de chaves pública e privada fazem parte do nosso cotidiano há anos, no entanto a novidade da *blockchain* se dá em sua capacidade única de gerar e comunicar consenso a respeito de uma base comum de dados mantida e atualizada por meio de uma rede descentralizada. Desta forma, para garantir que uma das partes envolvidas realmente tenham o ativo prometido em uma transação, basta uma simples consulta ao histórico da *blockchain*, sem a necessidade de um intermediário.

Resumidamente, duas analogias retratam bem o que é o *blockchain*. Na visão de Endeavor [2015], ela é como um grande livro-razão (onde se registra todas as movimentações contábeis de uma empresa) compartilhado por todos aqueles que participam do sistema, no qual as transações são registradas de forma irreversível. É o registro em ordem cronológica de todas as transações compiladas e validadas que ocorreram na rede. É público, único e compartilhado pelos participantes de um sistema específico. Já para Merz [2016], pode-se dizer que a *blockchain* é como um recife de coral em que apenas os últimos milímetros representam a biomassa ativa, o resto é apenas uma imagem morta do passado e acessado apenas em raras ocasiões para verificar dados históricos.

Tecnicamente, a arquitetura de uma *blockchain*, como descrito por Radu e Aleixo [2015], pode ser dividida em três partes: (i) “*provas de trabalho*” ou proof-of-work⁴, o que significa resolver um problema difícil para, então, ter o poder de adicionar informação a essa base de dados; (ii)

³O *blockchain* no contexto do Bitcoin é um protocolo voltado a assegurar a criação e a transferência de *tokens* criptográficos (pedaços de informação únicos no tempo e no espaço), cujo objetivo é a manutenção de um sistema de pagamentos completamente descentralizado [Aleixo, 2016].

⁴Algumas *blockchains* como Ethereum pretendem substituir no futuro o sistema de proof-of-work por proof-of-stake, no qual uma capacidade computacional muito menor é exigida da rede, e as decisões são tomadas pelos próprios membros da rede proporcionalmente à quantidade de recursos que possuem.



verificação da validade dessas informações a partir da data e hora em que foram lançadas à rede; e (iii) *criptografia* das informações, que, embora seja de fácil verificação, é praticamente impossível fraudá-las com a computação atual. No entanto, serviços baseados na tecnologia *blockchain* ainda estão suscetíveis (quase impossível) ao que se chama ataque 51%, no qual um usuário consegue manipular as informações a partir do controle da maior parte do poder de processamento da rede.

Radu e Aleixo [2015] ressaltam que a maioria dos projetos desenvolvidos são em código aberto e se pautam em transparência e colaboração. Isso permite que esta tecnologia seja à prova de censura, possibilitando então usos inovadores como votações eletrônicas e plataformas participativas para o desenvolvimento de leis ou orçamentos públicos. Também é citado pelos mesmos autores que a experimentação já começou até em redes de energia solar descentralizadas, como é o caso da GD. Porém, como apresentado por Kandaswamy [2016], projetos em *blockchain* variam em sua proposta de valor de acordo com o mercado analisado, por exemplo, pode-se definir operações entre empresas, ou dentro de uma única empresa; realizar um registro público ou uma adjudicação automática; ou ainda, o mais conhecido, usar como moeda digital. Merz [2016] completa que existe outra questão relativa à escolha de uma *blockchain*, que é o grau de integração com um mecanismo de processamento de pagamentos. Se o projeto se destina apenas à comunicação de dados ou à sincronização das aplicações dos participantes, não existem requisitos especiais a este respeito, no entanto, se as contas dos participantes forem usadas para fins contábeis, isso pode ser feito explicita ou implicitamente. No primeiro caso, os participantes definem um tipo de transação, “Pagamento”, que inclui, por exemplo, os campos de dados “Identificação do Pagador”, “Identificação do Beneficiário” e “Quantia”, utilizando essa transação sempre que uma transferência for feita entre essas contas. No entanto, a validação do lançamento da conta correspondente e quaisquer verificações se um valor foi confirmado, faz com que todos precisem ser tratados no nível de aplicação dos participantes. No segundo caso, o *blockchain* oferece um mecanismo de reserva nativo que pode ser usado por participantes em transações comerciais. Identidades já são conhecidas, portanto, apenas a quantia tem de ser determinada. O operador da *blockchain* executaria então uma validação do pagamento ao nível do sistema e também manteria os saldos das contas.

A partir desta variedade de aplicações, Merz [2016] relata a necessidade de que *blockchains* sejam configuradas de formas diferentes: alguns públicos, outros privados; alguns com identificação dos participantes, outros anônimos. Dentre essas classificações, comentaremos apenas sobre os contratos inteligentes, do inglês *smart contract*. No contexto da Internet das Coisas, do inglês Internet Of Things (IoT), existem os seguintes papéis envolvidos: o comprador, o vendedor e a "coisa", sendo a característica notável da *blockchain* necessária neste caso o uso de contratos inteligentes como um mecanismo de coordenação entre estes personagens/agentes.

Os contratos inteligentes permitem a execução automática de código no *blockchain*, geralmente com a finalidade de causar uma ação externa no curso de um evento de disparo definido. Podendo ser chamadas externas para aplicativos de software que realizam reservas adicionais ou a execução de outros contratos inteligentes. O poder do código do programa de um contrato inteligente pode variar consideravelmente, por exemplo, no *Bitcoin*, o código é uma linguagem de programação "orientada a pilha" simples que não permite *loops* de forma que os *deadlocks* no sistema sejam evitados; em outros sistemas como o *Ethereum*, consome-se dinheiro (neste caso: *ether*) quando executam contratos inteligentes, de modo que, no caso de um *loop* morto, a execução para quando o recurso financeiro acaba (também chamado de *gas*).

Nas arquiteturas de servidor tradicionais, cada aplicativo tem que configurar seus próprios servidores para executar seu próprio código isoladamente, o que dificulta o compartilhamento de dados e, se um único aplicativo estiver comprometido ou ficar *offline*, muitos usuários e outros aplicativos serão afetados. Em contrapartida, em *blockchains* como a *Ethereum*, os aplicativos funcionam exatamente como programado sem qualquer possibilidade de tempo de inatividade, censura, fraude ou interferência de terceiros. Inclusive podem ser personalizados, permitindo que os desenvolvedores criem mercados, armazenem registros de dívidas ou promessas, façam movimentações



financeiras de acordo com determinadas instruções e outras coisas, tudo sem um intermediário ou risco de contraparte [Wood, 2017].

4. Novas Propostas de Mercado de Energia Elétrica

Nesta seção listaremos algumas das aplicações em que o *blockchain* vem sendo estruturado a ponto de alterar o comércio de EE. Dado que as tecnologias envolvidas ainda estão surgindo e mudando rapidamente, ainda é incerto que direção essa mudança vai tomar, mas dependendo da aplicação e do interesse do regulador da rede elétrica, pode-se imaginar que mudanças acontecerão em um prazo bastante curto para as primeiras iniciativas se concretizarem e, um prazo longo para fundamentação dos processos praticados até agora.

De acordo com Merz [2016], a nova legislação na União Europeia permitiu uma nova configuração do mercado de EE com a desverticalização das empresas que faziam parte deste setor. Agora o mercado é caracterizado por um grande número de geradores e consumidores que trocam uma grande quantidade de dados e realizam um constante número de transações. De forma similar, no Brasil, o projeto Projeto RE-SEB permitiu as mesmas oportunidades, como descrito anteriormente. Este cenário é propício a competição e busca garantir o menor preço na comercialização de EE. Porém, se considerarmos que a energia pode ser revendida várias vezes dentro do continente (ou do nosso país) antes de chegar definitivamente ao consumidor final, faz-se necessário uma alto grau de padronização a fim de se manter um equilíbrio nas relações que ocorrem entre estas diversas empresas. Desta forma, a tecnologia de *blockchain* pode ser uma ferramenta para adequar e uniformizar este mercado.

Existem descrições na literatura da comercialização de energia estilo business-to-business (B2B), englobando inclusive o conceito de padronização de dados e comunicação entre as partes para o sucesso do mercado, porém no patamar da distribuição de EE a revolução provocada pelo *blockchain* tem um apelo à relação consumer-to-consumer (C2C), também conhecido por *peer-to-peer* nos sistemas de Tecnologias da Informação e Comunicação (TIC). Analogamente à estrutura de comercialização de EE brasileira, é como se as transações realizadas no ACL pudessem ser feitas no ACR com participação direta entre consumidores residenciais, em uma menor escala de tempo e sem um intermediário. Em alguns países, como a Inglaterra, já se permite que o consumidor residencial contrate energia diretamente do agente gerador, no entanto, ainda não existe um modelo que valide a comercialização entre os próprios consumidores residenciais.

A partir desta premissa, soluções estão sendo desenvolvidas para permitir que os consumidores finais participem de forma ativa do mercado de EE. Em outros termos, saindo de uma posição passiva com acúmulo de créditos de energia, para uma posição ativa, em que comercializa-se a energia gerada a fim de se obter lucro.

4.1. Soluções com blockchain em diferentes vertentes da GD

De forma mais singela e internacional, a *SolarCoin* é uma moeda digital que funciona como milhas para geração de energia solar. O sistema funciona de forma similar ao programa de pontos ofertado por cartões de créditos, assim ganha-se *solarcoins* de acordo com a geração produzida pelo proprietário, sendo basicamente uma tecnologia de incentivo à produção descentralizada de energia limpa e renovável.

Em Dhaka, Bangladesh, é sediada a *ME SOLshare Ltd*, uma empresa social com base em TIC que fornece plataformas de negociação de energia solar peer-to-peer (P2P) e soluções de financiamentos em EE fotovoltaica para famílias de baixa renda. Fundada em 2014, a SOLshare interconecta sistemas fotovoltaicos em áreas rurais e permite que seus usuários ganhem uma renda direta com a energia do Sol. A princípio, funciona de forma isolada da rede, mas diz-se preparada para a futura integração da eletrificação rural aos sistemas interligados de EE do país. O objetivo principal da empresa é empoderar as pessoas para que se tornem empreendedores na área solar e permitir a criação de uma *smart grid* de baixo para cima.

No entanto, também há modelos utilizando contratos inteligentes com a plataforma *blockchain*, como é o caso da *Brooklyn Microgrid*. Embora ainda limitada a alguns consumidores de uma



área do Brooklyn, em Nova York, o proprietário de uma GD fotovoltaica pode vender alguns kWh a um vizinho usando um contrato controlado pela *startup LO3* [Merz, 2016]. Porém este modelo ainda enfrenta as dificuldades regulamentares de comercialização de energia, pois encontra-se sob a área de concessão da distribuidora local, assim como ocorre atualmente no Brasil.

Na Austrália, a *Power Ledger* vai um pouco além da interação P2P, permitindo a comercialização de energia entre as unidades de um edifício e pelos consumidores da rede de distribuição. Segundo informativos no *site* da empresa, os proprietários de ativos de GD decidem a quem querem vender sua energia excedente e a que preço. Na plataforma disponibilizada há um mecanismo de negociação e compensação transparente, auditável e automatizado em benefício dos produtores e consumidores. Embora ainda esteja atuando em estado de Proof-of-Work (PoW), os testes já são realizados em parceria com a concessionária local de *Auckland* (Nova Zelândia), com a expectativa de que escolas, grupos comunitários e casas residenciais participem ativamente da iniciativa.

Diferentemente, na Alemanha, a RWE em conjunto com a empresa *Slock.it*, da Saxônia, usa a *blockchain* no setor de veículos elétricos para processos de pagamento de recargas nos postos públicos de energia. Para isso, utilizam uma unidade de contabilidade suportada por diferentes fornecedores de energia, a fim de fornecer aos condutores dos veículos um método de pagamento padrão. De acordo com Merz [2016], o sistema da RWE é baseado no produto *BigchainDB* desenvolvido pela *Ascribe*, de Berlim, mas ainda não se sabe até que ponto os contratos inteligentes são utilizados para o desbloqueio de estações de carregamento.

5. Conclusão

Neste trabalho pode-se apresentar de maneira sucinta o cenário brasileiro de comercialização de EE, permitindo que entendêssemos os rumos previamente determinados para que os pilares deste setor - a garantia da segurança do suprimento, a modicidade tarifária e a universalização do acesso à EE - sejam sempre alcançados. Essa medida se concretiza visto que as medidas políticas vigentes concordem que a EE é um fator decisivo não só para a qualidade de vida da população, mas também para a economia do país.

De forma geral, nota-se que as diversas referências consultadas apresentam as mesmas prerrogativas governamentais para permitir que um novo modelo de mercado de EE surja face a tecnologia de *blockchain*. Conforme mencionado por Aleixo [2016], há uma grande infraestrutura por trás de tudo isso, mas o conhecimento que esta tecnologia agrega e a acessibilidade para ser livremente adaptada, replicada ou implementada é peculiar, uma vez que permite a experimentação nos mais diversos mercados.

No entanto, é de comum acordo que ainda tem-se uma longa curva de aprendizagem. Como Merz [2016] ressalta, a GD é alimentada *in loco*, mas a sua geração nem sempre pode ser arbitrariamente distribuída, pois isso pode levar a desbalanceamentos elétricos nas redes de transporte de energia entre diferentes regiões. Outras questões técnicas também devem ser consideradas como a velocidade e a taxa de transação do *blockchain* frente a realidade de comercialização de energia. Merz [2016] questiona ainda quais medidas devem ser tomadas se uma das partes envolvidas não honrar o acordo feito no contrato inteligente, seja por não ter tido a capacidade de gerar a energia definida, ou por ter desistido da medida, ou por qualquer outra natureza pertinente. Situações como essas já são conhecidas no ACL e mediadas pela CCEE, mas como integrá-las as funcionalidades do *blockchain* ainda permanece um desafio.

A viabilidade do *blockchain* no mercado de EE depende também de outras considerações, como a formulação das tarifas a serem praticadas, visto que os tributos presentes atualmente devem ser reavaliados para este cenário e, uma redefinição do papel dos agentes distribuidores, uma vez que a interação P2P ainda não foi explorada em detalhes e carece de padronização.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer à agência de fomento FAPERJ pelo suporte parcial do trabalho e aos Srs. Luiz Alberto Fortunato e Sérgio Mafra pelas valiosas sugestões.



Vitor Nazário Coelho agradece a FAPERJ (processo E-26/202.868/2016) pelo apoio e fomento à pesquisa.

Referências

- ABRADEE (2017a). Tarifas de energia. Disponível em: <http://www.abradee.com.br/setor-de-distribuicao/tarifas-de-energia/tarifas-de-energia>. Acesso em: 11/04/2017.
- ABRADEE (2017b). Visão geral do setor. Disponível em: <http://www.abradee.com.br/setor-eletrico/visao-geral-do-setor>. Acesso em: 27/03/2017.
- Aleixo, G. (2016). O potencial transformador da tecnologia blockchain. Disponível em: <https://feed.itsrio.org/o-potencial-transformador-da-tecnologia-blockchain-777a5edf6a29>. Acesso em: 22/03/2017.
- ANEEL (2001). A aneel e o modelo do setor elétrico brasileiro. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/arquivos/pdf/ElleryFNE.pdf>. Seminário “A Crise Energética Brasileira”. Acesso em: 27/03/2017.
- ANEEL (2016a). Perguntas e respostas sobre a aplicação da resolução normativa nº 482/2012. Disponível em: http://www2.aneel.gov.br/arquivos/PDF/FAQ_GD_Atualizado.pdf. Acesso em: 24/03/2017.
- ANEEL (2016b). Superintendência de gestão tarifária: A tarifa de energia elétrica. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/tarifas>. Acesso em: 24/03/2017.
- ANEEL (2017a). Banco de informações de geração: Matriz de energia elétrica. Disponível em: www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm. Acesso em: 17/03/2017.
- ANEEL (2017b). Superintendência de gestão tarifária: Entendendo a tarifa. Disponível em: <http://goo.gl/rSZgYc>. Acesso em: 24/03/2017.
- ANEEL, S. d. G. T. S. (2017c). Bandeiras tarifárias. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/bandeiras-tarifarias>. Acesso em: 05/04/2017.
- ANEEL, S. d. G. T. S. (2017d). Modalidades tarifárias. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/tarifa-branca>. Acesso em: 18/04/2017.
- ANEEL, S. d. R. d. S. d. D. S. (2016c). Informações técnicas. Disponível em: <https://goo.gl/gRp4nG>. Acesso em: 17/03/2017.
- BRASIL (1995). Lei 8.987, de 13 de fevereiro de 1995. dispõe sobre o regime de concessão e permissão da prestação de serviços públicos previsto no art. 175 da constituição federal, e dá outras providências. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L8987compilada.htm. Acesso em: 30/03/2017.
- CCEE (2017a). Comercialização. Disponível em: www.ccee.org.br/portal/faces/pages_publico/onde-atuamos/comercializacao?_adf.ctrl-state=vffa9v100_14&_afLoop=168612157417897. Acesso em: 17/03/2017.
- CCEE (2017b). Como se dividem – categoria de agentes da ccee. Disponível em: https://www.ccee.org.br/portal/faces/pages_publico/quem-participa/como-se-dividem?_adf.ctrl-state=fqtwb5ka4_4&_afLoop=80021925404020. Acesso em: 27/03/2017.



- CCEE (2017c). Câmara de comercialização de energia elétrica: Fontes. Disponível em: www.ccee.org.br/portal/faces/pages_publico/onde-atuamos/fontes?_adf.ctrl-state=vffa9v100_14&_afLoop=168423410578607. Acesso em: 17/03/2017.
- CCEE, C. d. C. d. E. E. (2017d). Setor elétrico. Disponível em: www.ccee.org.br/portal/faces/pages_publico/onde-atuamos/setor_eletrico?_adf.ctrl-state=vffa9v100_14&_afLoop=168307393406329. Acesso em: 17/03/2017.
- Coelho, V. N., Coelho, I. M., Coelho, B. N., Cohen, M. W., Reis, A. J., Silva, S. M., Souza, M. J., Fleming, P. J., e Guimarães, F. G. (2016a). Multi-objective energy storage power dispatching using plug-in vehicles in a smart-microgrid. *Renewable Energy*, 89:730 – 742. ISSN 0960-1481.
- Coelho, V. N., Coelho, I. M., Coelho, B. N., de Oliveira, G. C., Barbosa, A. C., Pereira, L., de Freitas, A., Santos, H. G., Ochi, L. S., e Guimarães, F. G. (2016b). A communitarian microgrid storage planning system inside the scope of a smart city. *Applied Energy*, p. -. ISSN 0306-2619.
- Coelho, V. N., Cohen, M. W., Coelho, I. M., Liu, N., e Guimarães, F. G. (2017). Multi-agent systems applied for energy systems integration: State-of-the-art applications and trends in microgrids. *Applied Energy*, 187:820 – 832. ISSN 0306-2619.
- de Oliveira, F. J. A. Planejamento da operação do sistema interligado nacional. Slides do I Workshop da Operação, AES-Tietê, Bauru (SP). Acesso em: 07/04/2017, Out 2006.
- Endeavor (2015). Blockchain: conheça a tecnologia por trás da revolução das moedas virtuais. Disponível em: <https://endeavor.org.br/blockchain/>. Acesso em: 22/03/2017.
- Gellings, C. W. (2009). Chapter 1 - What is the Smart Grid. In *The Smart Grid: Enabling Energy Efficiency and Demand Response*. The Fairmont Press. ISBN ISBN 0-88173-624-4.
- Instituto IDEAL, A. d. S. (2017). Regulamentação. Disponível em: <http://americadosol.org/regulamentacao/>. Acesso em: 17/03/2017.
- Jiayi, H., Chuanwen, J., e Rong, X. (2008). A review on distributed energy resources and microgrid. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12(9):2472 – 2483. ISSN 1364-0321.
- Kandaswamy, R. (2016). Blockchain: How real is the market? Disponível em: <https://www.gartner.com/webinar/3607520>. Acesso em: 11/04/2017.
- Lemos, R. (2017). Como usar a blockchain para promover o interesse público? Disponível em: <https://goo.gl/AsUXPj>. Acesso em: 22/03/2017.
- Magalhães, G. d. S. C. (2009). Comercialização de energia elétrica no ambiente de contratação livre: uma análise regulatório-institucional a partir dos contratos de compra e venda de energia elétrica. Master's thesis, Universidade de São Paulo (USP), São Paulo. Acesso em: 29/03/2017.
- Merz, M. (2016). Potential of the blockchain technology in energy trading.
- Radu, R. e Aleixo, G. (2015). Blockchain e o futuro da governança. Disponível em: <https://goo.gl/5ZT2Uf>. Acesso em: 22/03/2017.
- Wood, G. (2017). Ethereum: homestead release. Disponível em: <https://ethereum.org/>. Acesso em: 23/03/2017.