

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLÓGICA DE SANTA
CATARINA – CÂMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

FÁBIO MATHEUS MANTELLI

**BLOCKCHAIN E SMART CONTRACTS: TRANSAÇÕES PEER-TO-
PEER PARA COMERCIALIZAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA DE
MICRORREDES**

FLORIANÓPOLIS, 2019.

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLÓGICA DE SANTA
CATARINA – CÂMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

FÁBIO MATHEUS MANTELLI

**BLOCKCHAIN E SMART CONTRACTS: TRANSAÇÕES PEER-TO-
PEER PARA COMERCIALIZAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA DE
MICRORREDES**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro(a) Eletricista.

Orientador:
Prof. Rubiara Cavalcante Fernandes, Dr.
Eng.

FLORIANÓPOLIS, 2019.

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor.

Mantelli, Fábio Matheus

Blockchain e Smart Contracts : transações Peer-to-Peer para Comercialização de Energia Elétrica de Microrredes / Fábio Matheus Mantelli ; orientação de Rubiara Cavalcante Fernandes. - Florianópolis, SC, 2019.

114 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) - Instituto Federal de Santa Catarina, Câmpus Florianópolis. Bacharelado em Engenharia Elétrica. Departamento Acadêmico de Eletrotécnica.

Inclui Referências.

1. Blockchain. 2. Smart Contracts. 3. Microrrede.
4. Hyperledger. 5. Comercialização. I. Fernandes, Rubiara Cavalcante. II. Instituto Federal de Santa Catarina. Departamento Acadêmico de Eletrotécnica. III. Título.

BLOCKCHAIN E SMART CONTRACTS: TRANSAÇÕES PEER-TO-PEER PARA COMERCIALIZAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA DE MICRORREDES

FÁBIO MATHEUS MANTELLI


Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica e aprovado na sua forma final pela banca examinadora do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina.

Florianópolis, 04 de julho de 2019.

Banca Examinadora:



Rubiara Cavalcante Fernandes, Dr. Eng.



Rafael Nilson Rodrigues, Dr. Eng.



Daniel Tenfen, Dr. Eng.

Este trabalho é dedicado a Deus e à minha família.

AGRADECIMENTOS

Os agradecimentos principais são direcionados ao Professor Daniel Lohmann, que, pela sua maestria e senso de justiça, conduziu-me à conclusão desta etapa em minha formação.

Agradeço à Direção de Ensino do Câmpus Florianópolis (IFSC), pela sua visão holística da Educação, pelo auxílio, pelo zelo e pela motivação em minha árdua jornada.

Ao Professor Dr. Eng. Rubiara Cavalcante Fernandes, pela orientação, dedicação, apoio e incentivo durante a graduação e o desenvolvimento do presente trabalho.

Aos meus pais pelos 34 anos de ajuda econômica e de moradia, sem os quais eu jamais teria condições de enfrentar uma segunda graduação, tendo em vista o equívoco e a frustração, pela inexperiência, de ter adentrado e concluído a primeira graduação sem respaldo e aceitação do mercado.

À minha namorada, Kauana Palma Silva, pelo incentivo, motivação e companheirismo ao longo dos últimos tempos. À sua irmã e minha cunhada, Karila Palma Silva, pela amizade.

Ao meu irmão Giovanni Antonio Mantelli e à sua esposa, Maria Cristina Arcego Mantelli, pelo carinho, companheirismo e centenas de horas compartilhadas no trânsito caótico de Florianópolis.

Aos meus antigos e melhores amigos de Chapecó, Ricardo Gasparetto, Leandro Barbieri, Eziquel Boita, Darci Fernando Boita, Mateus Troian Danieli, Alex Finckler Ximú e Maurício Skovronski.

Aos novos amigos, Paulo André Sehn da Silva, Rodolfo Bialecki Leandro, Valmor Zimmer, Pedro César Cordeiro Vieira, Marcelo Neujahr Agostini e Marcelo Benetti pela convivência, conselhos e convívio durante os anos de Projeto MedFasee BT.

A Deus, pelo dom da vida e pela capacidade Dele a tudo perdoar. A tua justiça é justiça eterna, e a tua lei é a verdade (Salmos 119:142).

“Dê-me, Senhor, agudeza para entender, capacidade para
reter, método e faculdade para aprender, sutileza para
interpretar, graça e abundância para falar, acerto ao começar,
direção ao progredir e perfeição ao concluir.”
(San Tommaso d’Aquino)

RESUMO

Ao longo do século XX, a expansão do setor elétrico esteve associada, geralmente, à construção de grandes usinas e extensas linhas de transmissão para suprir a demanda crescente de energia elétrica. Esse modelo foi a base do forte crescimento econômico, da industrialização e da evolução dos bens e serviços produzidos pelas nações. Esse paradigma de geração centralizada, no entanto, está a passar por transformações devido à expansão de Recursos Energéticos Distribuídos (RED), principalmente com a difusão de mini e microgeração distribuída em diversos países, inclusive no Brasil. Com as políticas de resposta da demanda cada vez mais presentes, os consumidores passam a ter um papel mais ativo, na qual novas tecnologias passam a emergir para facilitar a tomada de decisão nesse novo cenário. Nos últimos anos, o aumento de Geração Distribuída (GD) tem fomentado o desenvolvimento de microrredes – redes de distribuição de energia elétrica que podem operar isoladas ou conectadas ao sistema de distribuição –, sendo imprescindível a adoção de tecnologias para a liquidação do excedente de energia gerado pelos prosumers. Como alternativa, a tecnologia Blockchain possui potencial disruptivo e poderá ser utilizada pelas microrredes para o estabelecimento de contratos inteligentes de energia entre as Unidades Consumidoras (UCs). Todavia, ainda não há legislação específica no tocante a transações de energia pelas microrredes no Brasil – motivo pelo qual o seu crescimento ainda é incipiente. Ao redor do mundo, entretanto, as microrredes estão em crescimento e diversas iniciativas regulatórias estão sendo propostas. Concomitantemente, novas startups estão sendo criadas para utilizar a Blockchain no setor elétrico – inclusive em microrredes –, tendo em vista o potencial da tecnologia em questões de compartilhamento, privacidade, consenso e segurança das transações acordadas. No presente trabalho serão apresentados os conceitos subjacentes da tecnologia Blockchain e a sua evolução em transações financeiras eletrônicas. Será abordado, também, o framework Hyperledger da Linux Foundation, que tem como objetivo facilitar e alavancar a tecnologia Blockchain em diversas indústrias, inclusive no setor elétrico. Por fim, será demonstrada a configuração e utilização de uma plataforma computacional baseada em Blockchain para a liquidação de contratos de energia de microrredes conectadas à concessionária de distribuição de energia elétrica.

Palavras-chave: Recursos Energéticos Distribuídos. Microrredes. Contratos de Energia. Blockchain. Hyperledger.

ABSTRACT

Throughout the 20th century, the expansion of the electricity sector was generally associated with the construction of large power plants and extensive transmission lines to meet the growing demand for electricity. This model was the basis of strong economic growth and is directly related to the reduction of poverty to levels never before reached, considering that electric power plays a fundamental role in improving the quality of life of the population. This paradigm of centralized generation, however, is undergoing transformations mainly due to the expansion of distributed energy resources (DERs), and there is a strong trend of decentralization of electricity generation with the diffusion of microgeneration distributed in several countries, including Brazil. With demand response policies increasingly present, consumers are taking a more active role, in which new technologies are emerging to facilitate decision-making in this new scenario. In recent years, the increase in Distributed Generation (DG) has fostered the development of microgrids - electricity distribution networks that can operate in isolation from the distribution system - and the adoption of technologies is essential for the settlement of surplus energy generated by prosumers. As an alternative, Blockchain technology has disruptive potential and may be used by microgrids to establish smart contracts between consumers. However, there is still no specific legislation regarding energy transactions by microgrids in Brazil - which is why their growth is still incipient. Around the world, however, microgrids are growing and several regulatory initiatives are being proposed. At the same time, new startups are being created to use the Blockchain in the electricity sector – including microgrids –, given the potential of technology in issues of sharing, privacy, consensus and security of agreed transactions. This paper will present the underlying concepts of Blockchain technology and its evolution in electronic financial transactions. The Hyperledger framework (Linux Foundation) will also be addressed, with the objective of facilitating and leveraging Blockchain technology in several industries, including the electrical sector. Finally, the implementation and use of a Blockchain-based computing platform will be demonstrated for the settlement of energy contracts for microgrids connected to the distribution company.

Keywords: Distributed Energy Resources. Microgrids. Energy Contracts. Blockchain. Hyperledger.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Principais países com capacidade instalada de energia renovável	29
Figura 2 - Microrrede do condomínio Alphaville Fortaleza.	34
Figura 3 - Etiqueta de tempo e hash.	43
Figura 4 - Blockchain com uma sequência contínua de blocos.	48
Figura 5 - Estrutura do bloco.	48
Figura 6 - Iniciativas da tecnologia Blockchain no setor de energia elétrica por categoria.	54
Figura 7 - A estrutura (greenhouse) do Hyperledger.	64
Figura 8 - Rede Hyperledger Fabric.	69
Figura 9 - Rede Blockchain resumida.	70
Figura 10 - Dois clientes vendendo e comprando rabanetes.	71
Figura 11 - Cliente A inicia uma transação.	72
Figura 12 - Processo para endossar e verificar a assinatura da transação pelos nós A e B.	73
Figura 13 - Respostas da proposta são inspeciadas.	73
Figura 14 - Endosso da transação montada pelo cliente.	74
Figura 15 - Transações são validadas e confirmadas.	74
Figura 16 - Atualização do ledger.	75
Figura 17 - Estrutura do Hyperledger Composer.	76
Figura 18 - Arquitetura típica de soluções do Hyperledger Composer.	77
Figura 19 - Plataforma para transação de energia elétrica entre microrredes.	81
Figura 20 - UCs das duas microrredes que compõem o sistema.	82
Figura 21 - Geração fotovoltaica das UCs.	83
Figura 22 - Transação entre UCs.	84
Figura 23 - Transação entre a UC001-MR01 (produtor) e a UC006-MR02 (comprador).	85
Figura 24 - Transação entre a UC004-MR01 (produtor) e a UC010-MR02 (comprador).	86
Figura 25 - Transação entre a UC009-MR02 (produtor) e a UC008-MR02 (comprador).	86
Figura 26 - Situação após a liquidação dos contratos entre as UCs da plataforma.	88
Figura 27 - Transação entre a Distribuidora de energia e a UC003-MR01.	89
Figura 28 - Executada a transação entre a Distribuidora de Energia e a UC003-MR01.	89

Figura 29 - Transação entre a Distribuidora e a UC008-MR02.	90
Figura 30 - Confirmação da transação entre a Distribuidora e a UC008-MR02.	90
Figura 31 - Situação após a liquidação dos contratos entre as UCs da plataforma.	91
Figura 32 - UCs das 2 microrredes que compõem o sistema do Caso 3.	92
Figura 33 - Transação entre UC e banco.	93
Figura 34 - Transação entre UC e banco confirmada na Blockchain.	93
Figura 35 - Participantes da plataforma após aquisição de tokens pela UC001- MR01.	94
Figura 36 – Definição do Contrato 1 do Caso 3.	95
Figura 37 - Transação entre a UC001-MR01 (produtor) e a UC006-MR02 (comprador).	95
Figura 38 - Saldo das UCs do Caso 3 após a liquidação do Contrato 1.	96
Figura 39 - Definição do Contrato 2 do Caso 3.	96
Figura 40 - Transação entre a UC001-MR01 (produtor) e a UC010-MR02 (comprador).	97
Figura 41 - UCs das 2 microrredes que compõem o sistema do Caso 3.	97
Figura 42 - Europeia LV microgrid benchmark network.	98
Figura 43 - Demanda de eletricidade e demanda da rede de distribuição ao longo do dia.	99

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Probabilidade do alcance do invasor em relação aos nós honestos da rede.	45
Tabela 2 - Comparação entre Ethereum e Hyperledger Fabric.....	52
Tabela 3 - Cadastro das 10 UCs pertencentes às 2 microrredes do Caso 1.	82
Tabela 4 - Situação da plataforma de comercialização após a liquidação entre as UCs do Caso 2.	87
Tabela 5 - Cadastro das 10 UCs pertencentes às 2 microrredes do Caso 3.	92
Tabela 6 - Consumo e Geração da European LV microgrid benchmark network....	100

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

ACR – Ambiente de Contratação Regulada

ACL – Ambiente de Contratação Livre

API – Application Programming Interface

B2C – Business-to-Consumer

CCEE – Câmara de Comercialização de Energia Elétrica

CEPEL – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica

EPE – Empresa de Pesquisa Energética

EVM – Ethereum Virtual Machine

FER – Fontes de Energia Renováveis

GD – Geração Distribuída

GLD – Gerenciamento pelo Lado da Demanda

IBM – International Business Machines

IGC – Independent Committee on Geoethics

IoT – Internet of Things

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change

MME – Ministério de Minas e Energia

MP – Medida Provisória

P2P – Peer-to-Peer

PBFT – Practical Byzantine Fault Tolerance

PL – Plano de Lei

PIE – Produtor Independente de Energia

PoW – Proof-of-Work

PoS – Proof-of-Stake

RD – Resposta da Demanda

RED – Recursos Energéticos Distribuídos

RN – Resolução Normativa

SEB – Setor Elétrico Brasileiro

SEP – Sistema Elétrico de Potência

TI – Tecnologia da Informação

UC – Unidade Consumidora

VE – Veículos Elétricos

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Definição do Problema	17
1.2	Justificativa	18
1.3	Objetivos	20
1.3.1	Objetivo Geral	20
1.3.2	Objetivos Específicos	20
1.4	Estrutura do trabalho	20
2	REVISÃO DA LITERATURA	22
2.1	O mercado de energia elétrica brasileiro	22
2.2	Geração distribuída	25
2.3	Microrredes	27
2.3.1	Políticas, incentivos e barreiras para a inserção de microrredes no mundo	28
2.3.2	Regulação de microrredes no Brasil	31
2.3.3	Comercialização de energia peer-to-peer em microrredes	35
2.4	Smart grids e internet of things	36
2.5	Tecnologia blockchain: estado da arte e aplicações no setor elétrico	37
2.5.1	Contratos inteligentes	37
2.5.2	Bit gold	38
2.5.3	Bitcoin	42
2.5.4	Blockchain.....	46
2.5.5	Ethereum.....	51
2.5.6	Aplicações da Blockchain no setor elétrico	53
2.5.6.1	<i>LO3: The Brooklyn Microgrid</i>	57
2.5.6.2	<i>Grid+: wholesale pricing for residential customers</i>	58
2.5.6.3	<i>Electron: multi-sided flexibility markets</i>	59
2.5.6.4	<i>EDP Brasil e Riddle & Code</i>	59
3	HYPERLEDGER BLOCKCHAIN	61
3.1	Hyperledger e Linux Foundation	61
3.1.1	Benefícios de softwares de código aberto	62
3.2	Framework Hyperledger	63
3.2.1	Hyperledger Fabric.....	64
3.2.1.1	<i>Principais recursos do framework Hyperledger Fabric</i>	66
3.2.1.2	<i>Nós da rede Hyperledger</i>	70
3.2.1.3	<i>Mecanismo de consenso</i>	71
3.2.2	Hyperledger Composer	75
4	ESTUDO DE CASO	79
4.1	Pré-requisito	79
4.2	Processo de implantação da rede de comercialização de energia elétrica	80
4.2.1	Caso 1: liquidação de contratos na plataforma com duas microrredes	81
4.2.2	Caso 2: liquidação de contratos entre microrredes e a concessionária de distribuição	87
4.2.3	Caso 3: transação entre banco e UC e liquidação de contratos entre Ucs de microrredes distintas	91

4.2.4	Caso 4: Liquidação de contratos utilizando a Benchmark LV Microgrid.....	98
5	CONCLUSÃO	102
	REFERÊNCIAS.....	105
	BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTAR.....	114

1 INTRODUÇÃO

Em 02 de setembro de 1969, ocorreu a primeira troca de mensagens (e-mail) entre dois computadores – um marco na tecnologia da informação. A partir disso, uma série de inovações tecnológicas surgiram – compartilhamento de dados, Internet, transações bancárias on-line, comunicação em tempo real, etc. –, sendo responsável pela redução de custos para as empresas, pela criação de novos empregos e oportunidades e pelo aumento de transações comerciais e financeiras entre as nações (globalização). O surgimento de empreendedores que se tornaram bilionários com as inovações que criaram nessa nova etapa tecnológica – Bill Gates, Steve Jobs, Jeff Bezos, etc. – trouxe muitos benefícios à sociedade, tendo em vista que, de toda a riqueza criada pelas inovações desenvolvidas, os empreendedores inovadores capturaram apenas 2,2% do valor total gerado (NORDHAUS, 2004). Ou seja, o valor criado para a sociedade foi 40 vezes maior do que o lucro que receberam para isso. Os benefícios são percebidos todos os dias, como, por exemplo, a redução do custo das comunicações e das transações comerciais.

Toda evolução tecnológica traz consigo novas oportunidades e desafios, que são intrínsecos ao processo de melhoria do bem estar das sociedades modernas. Por mais de um século, a produção de energia elétrica manteve intacto o seu formato inicial: construção de grandes usinas e transmissão da sua produção de energia elétrica em corrente alternada aos centros consumidores. Esse formato foi a base para o rápido crescimento econômico dos países e pela redução da pobreza a níveis nunca antes alcançados pelas sociedades – em 1820, antes do advento da energia elétrica, aproximadamente 85% da população mundial vivia na pobreza abjeta; em 2015, menos de 10% da humanidade vive em tais condições, segundo estudo do Banco Mundial (FERREIRA *et al.*, 2015).

Atualmente, no entanto, esta concepção tradicional – fluxo de energia unidirecional – tem sido alterada devido, principalmente, à produção de energia elétrica proveniente de painéis fotovoltaicos instalados em áreas residenciais. O fluxo de energia elétrica torna-se, assim, bidirecional, pois o excedente produzido é injetado diretamente na rede de distribuição de energia elétrica. Novos desafios passam a

figurar nesse cenário – tanto no tocante a questões técnicas e ambientais como em relação aos aspectos de mercados de energia elétrica – e, como consequência, novas oportunidades tecnológicas são apresentadas a cada dia.

Nos últimos anos, a disseminação de RED¹ de pequeno porte (painéis fotovoltaicos, geradores eólicos, etc.), aliada à integração cada vez maior de tecnologias de informação e comunicação, tem trazido novas possibilidades aos agentes que compõem o sistema elétrico. Nesse ambiente, a literatura tem definido como imprescindível a criação de agentes agregadores, cuja função é operar os recursos distribuídos, com o intuito de garantir uma boa performance do sistema elétrico como um todo. As microrredes surgem como tendência, pois são uma forma de agregação com dimensão e níveis de complexidade bastante variadas. É possível, assim, operar os RED de forma coordenada, de acordo com os diferentes modelos de negócio, tendo em vista que cada país adota um nível de liberalização do mercado de energia elétrica. Ou seja, microrredes referem-se a um sistema de fornecimento local de energia (próximo aos consumidores) com fontes de energia distribuída independentes do sistema convencional de alta potência (KIM, 2014).

Em sistemas de energia com mercados liberalizados, incluindo a possibilidade dos consumidores residenciais adentrarem ao mercado livre de energia elétrica, tecnologias modernas precisam ser incorporadas para efetuar e garantir a autenticidade das transações de energia elétrica. Atualmente, a Blockchain tem figurado como uma tecnologia disruptiva que impactará diversos setores, incluindo o setor elétrico.

A Blockchain é uma tecnologia de registros distribuídos que tem por objetivo garantir a segurança das transações por meio da descentralização da informação. Os registros são compartilhados e distribuídos para criar um índice global de todas as transações realizadas ao longo do tempo por um determinado mercado. A tecnologia funciona como um livro razão contábil (ledger) compartilhado, público (ou não), para criar consenso e confiança na comunicação direta entre as partes envolvidas, desprendendo os intermediários das transações.

¹ Tecnologias de geração e/ou armazenamento de energia elétrica, localizados dentro dos limites da área de uma determinada concessionária de distribuição.

Existem diversas iniciativas e estudos da utilização da tecnologia Blockchain para o setor elétrico ao redor do mundo (KÜFEOGLU *et al.*, 2019) (PLAZA *et al.*, 2018), incluindo as transações de contratos de energia entre participantes de microrredes (KANG *et al.*, 2018) (KIM; PARK; RYOU, 2018) (GORANOVIC *et al.*, 2017) (SILVESTRE *et al.*, 2018). No entanto, há diversos entraves regulamentares que precisam de alterações nos próximos anos para que a utilização da tecnologia torne-se realidade.

1.1 Definição do Problema

A inserção cada vez maior de RED – GD, armazenamento de energia, gerenciamento da demanda e eficiência energética – traz consigo, inevitavelmente, o debate a cerca de um novo modelo do setor elétrico. Em países desenvolvidos, como, por exemplo, os Estados Unidos da América, um novo modelo regulatório e de negócios foi proposto em 2016, no estado de Nova York, para a ampliação dos RED (ZIBELMEN, 2016). Foram definidos princípios orientadores para incentivar projetos de sistemas de energia mais limpos, avançados e eficientes.

O aumento da energia renovável, aliada a Internet of Things (IoT) tem desafiado o modelo regulatório das concessionárias de energia elétrica. Apesar do debate sobre os benefícios da IoT estar direcionado às redes de energia elétrica existentes, o desenvolvimento de microrredes traz novas possibilidades e futuras alterações regulatórias, tendo em vista que diversas iniciativas ao redor do mundo estão desenvolvendo tecnologias inovadoras, tanto para geração e distribuição, como para o uso da eletricidade a nível local (bairros).

Com a capacidade de ilhamento das microrredes em momentos de contingências da rede de distribuição de energia elétrica (sobretensões, blecautes, etc.), os RED são capazes de suprir a energia às UCs. No entanto, um novo mecanismo de mercado para contabilizar a geração e o consumo faz-se necessário. É nesse ambiente que a tecnologia Blockchain traz uma solução: transacionar a energia elétrica entre os produtores e consumidores de uma microrrede em momentos de desconexão da rede de distribuição. Ademais, a tecnologia tem potencial também para ser utilizada pelas microrredes mesmo quando estão conectadas à rede de distribuição, pois é necessário efetuar a contabilização individual das UCs. Em países

avançados, na qual há a possibilidade das UCs serem remuneradas pelo seu excedente de energia elétrica injetado na rede de distribuição, a tecnologia pode ser utilizada em conjunto pelas microrredes e pela concessionária de energia elétrica.

É possível utilizar a tecnologia Blockchain para a comercialização de energia elétrica entre microrredes? E entre microrredes e a concessionária de distribuição de energia elétrica? Há restrições normativas no Brasil para isso? Por que utilizar a tecnologia Blockchain para firmar contratos de energia elétrica entre prosumers e consumidores em uma microrrede?

1.2 Justificativa

Os sistemas de energia elétrica ao redor do mundo estão em profunda reestruturação devido à crescente inserção de energia renovável – principalmente fontes eólicas e solares – em suas matrizes. Apesar da falta de competitividade com as tradicionais fontes de energia, esse incremento está baseado em políticas energéticas adotadas – subsídios, isenção de impostos, etc. –, na separação do setor energético e por novas tecnologias desenvolvidas. Na Alemanha, por exemplo, em 8 de maio de 2016, 95% da demanda de energia elétrica foi suprida por fontes renováveis – 45,2% solar, 36% eólica, 8,9% biomassa e 4,8% hidráulica (WEAVER, 2016). Porém, como as FER dependem das condições climáticas – intermitência do vento, incidência solar, etc. –, novos desafios surgem em relação à operação e ao gerenciamento dos sistemas elétricos (WANG *et al.*, 2017) (DONG *et al.*, 2010).

Concomitantamente à inserção de grandes plantas de geração eólica e solar, o uso de painéis fotovoltaicos em residências também têm sido incentivado por ações governamentais. Em 2017, a capacidade no mundo – proveniente desta fonte - chegou a 402,5 GW – 98 GW foram instalados apenas naquele ano (SAUAIA, 2018). No Brasil, também houve um crescimento expressivo (1,1 GW), compondo o grupo dos 10 países com maior capacidade instalada de geração fotovoltaica no mundo.

As sociedades da idade contemporânea² adentraram a chamada Quarta Revolução Industrial (Indústria 4.0), que está baseada na automatização das fábricas no intuito de elevar os níveis de rendimento e qualidade dos processos (SCHWAB, 2016). O setor elétrico, apesar de ser mais reativo quanto às inovações tecnológicas, tem buscado, a cada dia, soluções na Indústria 4.0, tendo em vista os novos desafios de operar um sistema cada vez mais descentralizado e com novos agentes e formatos de geração de energia elétrica – GD, painéis solares, plantas eólicas, etc. Cenários tecnológicos inovadores que englobam redes inteligentes, mini e microgeração, veículos elétricos, gestão de energia e cidades inteligentes estão cada vez mais presentes e têm sido amplamente debatido na academia e pelas empresas do setor elétrico mundial.

Devido à complexidade e à dimensão do SEB, as inovações tecnológicas demoram para serem inseridas, dado que, qualquer alteração, deve ser bem avaliada para que os impactos sejam positivos e não tragam inconvenientes no médio e longo prazos. Todavia, a tecnologia da informação está presente nos mais diversos seguimentos da sociedade e é premente a sua adaptação no setor de energia elétrica, tendo em vista a redução de custos e modernização dos processos – principalmente em monitoração, operação e controle e em contratos e transações de energia elétrica.

A inserção crescente de GD traz à tona novos desafios operacionais, sendo que as redes inteligentes terão papel preponderante. A alteração de paradigma, na qual a geração de energia elétrica através de grandes usinas tem cedido espaço a usinas de menor porte – conectadas próximas ou mesmo nas próprias UCs –, necessitará de uma operação coordenada e flexível. Por outro lado, essa nova configuração de geração de energia traz consigo mudanças também no mercado de energia elétrica, sendo que os consumidores necessitarão de mais informações para servir de suporte à tomada de decisão no momento da compra (venda) de energia elétrica. A contabilização e a liquidação do excedente de geração de energia dos prosumers precisará de novas tecnologias e mecanismos ágeis, confiáveis e flexíveis.

² Época da histórica com início em 1789 (Revolução Francesa) e que continua até os dias atuais.

Para isso, os agentes que compõem o sistema precisarão compartilhar cada vez mais informação e a IoT será determinante para esse objetivo.

Em um cenário onde microrredes poderão transacionar o excedente de energia entre si e com a concessionária de distribuição, a tecnologia Blockchain poderá ser uma alternativa para a redução de custos e para a segurança das transações comerciais.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem com objetivo implementar e configurar um ambiente de contratação de energia elétrica para microrredes conectadas à rede de distribuição de energia elétrica com base na tecnologia Blockchain.

1.3.2 Objetivos Específicos

Este trabalho tem como objetivos específicos:

- a) Demonstrar a viabilidade técnica da inserção da tecnologia Blockchain para contratos de energia elétrica;
- b) Definir e instalar um framework de contratos inteligentes de energia elétrica para aplicações em microrredes;
- c) Analisar a regulamentação brasileira no tocante à comercialização de energia elétrica pelas microrredes.

1.4 Estrutura do trabalho

Este Trabalho de Conclusão de Curso está dividido da seguinte forma: no Capítulo 2 são apresentados os referenciais teóricos que abordam o mercado de energia elétrica brasileiro, a Geração Distribuída, as microrredes, as Smart Grids e a Internet of Things e a tecnologia Blockchain: estado da arte e aplicações no setor elétrico; no Capítulo 3 são abordados o projeto Hyperledger e o framework

Hyperledger Fabric – infraestrutura Blockchain para redes permissionadas que fornece uma arquitetura modular para a execução de smart contracts; Por fim, no Capítulo 4, são apresentados os resultados do estudo de caso de uma rede Blockchain para a transação de contratos inteligentes de microrredes conectadas à rede de distribuição de energia elétrica.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo será apresentado o referencial teórico utilizado como base para o desenvolvimento do estudo. Para isso, divide-se em três partes: (1) O Mercado de Energia Elétrica Brasileiro; (2) Políticas Incentivos e Barreiras para a Inserção de Microrredes no Mundo; e (3) Tecnologia Blockchain – Estado da Arte e Aplicações no Setor Elétrico.

2.1 O mercado de energia elétrica brasileiro

Durante 60 anos, o SEB foi controlado pelo Estado e com limitado investimento de capital privado. As empresas estatais assumiram a função de empresas de distribuição de energia elétrica (a maioria pertencentes aos estados) e a Eletrobrás foi responsável pela transmissão e também pela maior parte do setor de geração de energia elétrica. Toda essa infraestrutura foi importante para o rápido crescimento econômico do país.

O Brasil passou, no entanto, por diversas crises nos anos 1980, tanto em aspectos econômicos (hiperinflação) como de escassez de investimentos em infraestrutura – existia a percepção do esgotamento da capacidade de investimento do Estado. Em decorrência disso, entre 1995 e 2003, introduziu-se o modelo clássico de reforma no mercado atacadista de eletricidade de curto prazo, tendo como base os países que o adotaram – Chile, Inglaterra e País de Gales e os países nórdicos (PAGLIARDI; SOBREIRO DIAS, 2011). A reforma institucional teve como objetivos básicos assegurar os investimentos para a expansão da oferta de energia e tornar o setor elétrico economicamente eficiente, utilizando os recursos disponíveis para o suprimento confiável e com menor custo possível. Para alcançá-los, estabeleceu-se a competição nos segmentos de geração e comercialização para consumidores livres (aumento de eficiência e redução de preços) e foram mantidos os monopólios regulados nas atividades de transmissão, distribuição e comercialização para os consumidores cativos (CGSE, 2002).

O mercado de energia elétrica brasileiro está dividido, atualmente, em dois seguimentos: Ambiente de Contratação Regulada (ACR) e Ambiente de Contratação Livre (ACL). O ACR é composto dos agentes de geração, distribuição e consumidores

cativos sob forte regulação estatal. Para garantir a expansão de oferta de energia elétrica, o governo define regras para que as distribuidoras projetem suas demandas futuras. Através de leilões de energia, são firmados contratos bilaterais entre geradores e distribuidoras de acordo com o menor preço de venda ofertado (megawatt-hora). Dessa forma, os consumidores cativos podem apenas comprar energia da concessionária de distribuição a qual estão conectados. A fatura de energia elétrica é então emitida uma vez ao mês, sendo composta pelos serviços de distribuição e geração de energia elétrica e pela tarifa definida pela ANEEL.

O ACL é composto pelos agentes geradores, distribuidores e pelos consumidores livres. Diferentemente do ambiente regulado, o ACL possui preços, prazos de concessão e quantidades de energia que podem ser livremente negociados entre os agentes que compõem o mercado, apenas com a ressalva dos contratos serem registrados na CCEE. Os consumidores que atendem aos critérios³ definidos atualmente ficam expostos aos riscos de mercado. Ademais, os consumidores livres precisam dimensionar corretamente sua contratação de energia, pois caso seja consumido mais (menos) energia, obrigatoriamente precisará comprar (vender) a diferença acordada. Esse excedente (ou déficit) é valorado através do PLD, computado semanalmente pela CCEE com base em modelos desenvolvidos pelo CEPEL. Como o PLD possui sensibilidade quanto a fatores climáticos adversos (RIBEIRO, 2017), como, por exemplo, a falta de água nos reservatórios das UHE em momentos de secas prolongadas – aumento drástico do CMO⁴ –, o correto planejamento dos montantes contratos é imprescindível para embasar a tomada de decisão dos consumidores livres, tendo em vista as inúmeras variáveis para se operar em um ambiente de mercado livre.

³ Podem fazer parte do ACL as UCs com carga maior ou igual a 3000 kW com nível de tensão maior ou igual a 69 kV; UCs instaladas após julho de 1995, com demanda maior ou igual a 3.000 kW e atendidas em qualquer nível de tensão (BRASIL, 1995); e UCs com demanda maior ou igual a 500 kW atendidas em qualquer nível de tensão, desde que comprem energia proveniente de fontes incentivadas (PCHs, usinas de biomassa, eólicas e cogeração qualificada.) (BRASIL, 1998).

⁴ Custo por unidade de energia produzida para atender a um acréscimo de carga no sistema (ANEEL, 2004). O PLD é definido com base no CMO.

Uma nova reforma do setor elétrico começou a tramitar no Congresso Nacional em 2018, principalmente para alterar o ambiente regulatório, que foi severamente abalado após o governo federal ter decretado a MP no 579, em 11 de setembro de 2012 (ASSUNÇÃO; TAKAMATSU; BRESSAN, 2015) – transformada, posteriormente, em Lei no 12.783, em 11 de janeiro de 2013 (CASTRO; BRANDÃO, 2013). No entanto, o Congresso optou, em 2018, por debater um PL que tratava da portabilidade da conta de energia elétrica (PL no 1917/15) para a abertura do mercado livre aos consumidores cativos. No modelo vigente, apenas grandes consumidores – indústrias, supermercados, shopping centers, etc. – podem escolher o seu fornecedor de eletricidade. Com o PL, buscou-se reduzir os limites para o ingresso no Mercado Livre de energia elétrica, embora desde 1995 (Lei no 9.074) (BRASIL, 1995) exista a previsão legal para abertura progressiva do mercado de energia elétrica. A proposta tinha como meta permitir que os consumidores atendidos em tensão igual ou superior a 2,3 kV pudessem participar do mercado livre de forma gradual, ou seja, inicialmente UCs com potência superior a 2 MW e, a cada ano, reduzindo-se gradativamente, até que, em 2026, UCs sem limite de carga. Além disso, até o final de 2022, o Poder Executivo deverá apresentar um plano para a extinção integral do requisito mínimo de carga para consumidores que são atendidos com tensão inferior a 2,3 kV, que deverá vigorar a partir de 2028. O PL previa também que, a partir de 2021, os consumidores com carga inferior a 500 kW pudessem ser representados por meio de agentes varejistas na CCEE (SCARAMUCCI; ARONNE, 2019).

Sendo temas importantes associados à abertura do mercado livre de energia elétrica, a equipe que estava no governo em 2018 – no momento da publicação da Consulta Pública 33/2017 – , através do MME, em dezembro de 2018, publicou nova consulta pública reduzindo os limites de acesso ao mercado livre:

- a) A partir de 01/07/2019, os consumidores com carga igual ou superior a 2,5 MW atendidos em qualquer nível de tensão poderão migrar para o mercado livre;
- b) A partir de 2020, os consumidores com carga igual ou superior a 2 MW atendidos em qualquer nível de tensão poderão migrar para o mercado livre (SCARAMUCCI; ARONNE, 2019).

A minuta do projeto foi apresentado ao planalto, porém os textos não foram votados até o fim de 2018. Segundo o mercado, a expectativa é de que a equipe do atual ministro de Minas e Energia, almirante Bento Albuquerque, aproveite o trabalho realizado para que o encaminhamento ocorra de forma mais célere, mesmo com ajustes sendo necessários, durante o ano de 2019.

2.2 Geração distribuída

A GD é um termo utilizado para definir a energia elétrica produzida através de sistemas geradores instalados próximos ou na própria UC e que estão conectados à rede de distribuição de energia elétrica (Chiradeja, 2005). Nesse cenário, os consumidores alteram a sua condição de passividade na rede elétrica – apenas consumiam energia proveniente de fontes distantes, tais como UHE e UTE – e tornam-se agentes ativos, fornecendo a energia elétrica proveniente de sua própria geração (painéis fotovoltaicos, por exemplo) à rede de distribuição.

O termo GD ganhou destaque devido, principalmente, à proliferação e incentivos para o desenvolvimento de painéis fotovoltaicos e pela pressão de agentes internacionais sem qualquer evidência de que a ação antropogênica causa um suposto aquecimento global (FELÍCIO, 2014). Diversos cientistas e entidades, como, por exemplo, a Independent Committee on Geoethics (IGC), promovem estudos e conferências para contrapor o Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Entre 7 e 9 de setembro de 2018, realizou-se a The Porto Climate Conference, na Universidade do Porto, Portugal, na qual reuniu especialistas em meteorologia, oceanografia, matemática, geofísica, geologia, química e geografia para uma audiência de 80 pessoas de países como Nova Zelândia, Noruega, Suécia, França, Alemanha, Itália, República Tcheca e Portugal. Na conferência, foram debatidas questões científicas a respeito das controvérsias das mudanças climáticas e do efeito estufa (ARAÚJO; KLEIN; MÖRNER, 2018). Apesar das divergências científicas do aquecimento global e das mudanças climáticas, tendo em vista que é uma hipótese⁵

⁵ 3 Os modelos climáticos, utilizados pelo IPCC para embasar o aquecimento global antropogênico, estão repletos de hipóteses não testadas. Karl Popper (1902-1994) verificou que o método científico deve trabalhar com o falseamento: uma hipótese deve ser testada não apenas

e não uma teoria, a inserção de painéis fotovoltaicos e a GD tem se expandido em países desenvolvidos e a cada ano tem crescido a sua utilização em países em desenvolvimento. Sendo assim, há a necessidade de analisar o marco legal que trata especificamente da inserção de GD no Brasil.

A partir de 17 de abril de 2012, quando a RN no 482 foi definida pela ANEEL (ANEEL, 2012) – posteriormente alterada pela RN no 687/2015 (ANEEL, 2015b) –, o consumidor brasileiro obteve o direito de gerar a sua própria energia elétrica por meio de fontes renováveis ou cogeração qualificada e fornecer o excedente à rede de distribuição local. Foram estabelecidas as condições gerais para o acesso de microgeração⁶ e minigeração⁷ distribuídas aos sistemas de distribuição e ao sistema de compensação de energia elétrica.

As novas regras, que passaram a valer a partir de primeiro de março de 2016, definiram que, se a energia gerada em um determinado mês for superior à energia consumida naquele período, o consumidor poderá ficar com os créditos e abater em faturas subsequentes (ANEEL, 2015a). O prazo de validade dos créditos passou de 3 anos (36 meses) para 5 anos (60 meses), além de poder utilizar os créditos para abater faturas de UCs do mesmo titular em outra localidade, desde que esteja na área de concessão ou permissão da mesma distribuidora – A ANEEL definiu esse tipo de utilização como “autoconsumo remoto” (ANEEL, 2015b). Outra regra definida na RN estabelece a possibilidade de GD em condomínios com múltiplas UCs. A energia gerada pode ser repartida entre os condôminos e as porcentagens individuais são definidas pelos próprios consumidores. Além das regras supracitadas, a ANEEL definiu a possibilidade de criação de consórcios ou cooperativas no intuito

procurando evidências que a comprove, mas procurando evidências que a refute. Sobre a crítica ao aquecimento global antropogênico, consultar “A fraude do aquecimento global: como um fenômeno natural foi convertido numa falsa emergência mundial” (LINO, 2009) e “Aquecimento Global: alarme falso” (ALEXANDER, 2010).

⁶ Central geradora de energia elétrica com potência instalada menor ou igual a 75 kW proveniente de fontes renováveis ou cogeração qualificada.

⁷ Central geradora de energia elétrica com potência instalada superior a 75 kW e menor ou igual a 3 MW proveniente de fontes hídricas ou menor ou igual a 5 MW para qualquer outra fonte renovável ou cogeração qualificada.

de instalar micro ou minigeração, sendo que a geração pode ser utilizada para a redução das faturas dos consorciados ou cooperados (ANEEL, 2015a). Apesar dos avanços realizados pela ANEEL, ainda não há a possibilidade do excedente gerado ser revertido financeiramente. A validade dos créditos tem um prazo limite de 60 meses.

2.3 Microrredes

Os RED são tecnologias de geração e/ou armazenamento de energia elétrica instalados dentro dos limites definidos de uma concessionária – geralmente junto às UCs – atrás de um medidor de energia. Essa definição, ao longo do tempo, tem inserido outras vertentes, tais como a eficiência energética, a resposta da demanda (RD) e o gerenciamento pelo lado da demanda (GLD) (EPE, 2018). Os RED permitem, assim, uma maior participação dos consumidores, tanto no tocante à geração de energia elétrica, quanto à gestão e à racionalização do próprio consumo de energia elétrica.

O *World Energy Council* tem antevisto que, entre 2017 e 2025, diversos países alterarão seus sistemas elétricos centralizados para sistemas híbridos, sendo que aumentará a complexidade de operação e coordenação pelos operadores desses sistemas (WORLD ENERGY COUNCIL, 2017). Será necessário, dessa forma, novas práticas de planejamento da expansão e operação das redes elétricas. Todavia, os RED trazem benefícios – quando bem planejados e operados –, tais como a redução de perdas (geração próxima ao consumo) e postergação de investimentos em usinas convencionais. Com a inclusão da IoT⁸, há ganhos no tocante à eficiência, pois é possível criar a figura dos “agregadores” de RED, formando plantas virtuais⁹ para o despacho no mercado de eletricidade (EPE, 2018). Em relação às inovações tecnoló-

⁸ Internet of Things é um conceito que busca conectar qualquer dispositivo à Internet e a outros dispositivos conectados. Será abordado na subseção 2.4

⁹ Sistema descentralizado de gerenciamento de energia, que agrega pequenas unidades geradoras e cargas controláveis. É uma representação flexível de um portfólio de RED que pode ser utilizado para firmar contratos de energia elétrica em mercados atacadistas e para oferecer serviços ao operador do sistema (NAINA *et al.*, 2017).

gicas, Dütsch *et al.* (2017) relata que é possível utilizar a tecnologia Blockchain para integrar informações locais, otimizar as redes, além de oferecer serviços energéticos com custo reduzido através da utilização de contratos inteligentes (smart contracts).

Segundo o *The U. S. Department of Energy's Microgrid Initiative*¹⁰ uma microrrede consiste em um grupo de cargas interconectadas e RED dentro de limites técnicos claramente definidos e que atuem como uma única entidade controlável em relação à rede. Além disso, uma microrrede pode se conectar e desconectar da rede elétrica convencional para permitir a operação tanto em modo conectado como em ilha (TON; SMITH, 2012).

Para que a microrrede possa operar no modo ilhado, é necessário um sistema de controle interno que assegure o balanço de geração e consumo dentro dos limites estabelecidos de tensão e frequência elétricas (LAI *et al.*, 2016). Geralmente, há uma segunda camada de controle para executar o Gerenciamento Energético (GE) para promover a otimização econômica da operação (OLIVEIRA *et al.*, 2017). Ou seja, o GE tem como objetivo determinar o despacho ótimo de geração, além de prover uma política de demanda de carga controlável para minimizar, em um horizonte de planejamento, o custo da operação com base em restrições econômicas e técnicas (TENFEN; FINARDI, 2015).

As tecnologias de GD estão cada vez mais acessíveis financeiramente aos consumidores. Um consumidor, por exemplo, pode ter um gerador de backup e adquirir painéis fotovoltaicos e baterias para armazenamento. De acordo com o custo da energia ao longo do dia, é possível, utilizando a IoT, maximizar a utilização dos recursos com vistas a minimizar os seus custos. A microrrede pode, assim, integrar os RED e otimizá-los.

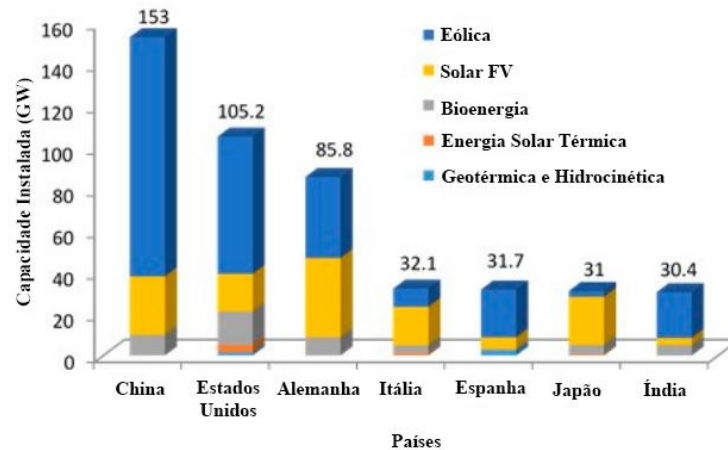
2.3.1 Políticas, incentivos e barreiras para a inserção de microrredes no mundo

Em 2014, os países líderes em desenvolvimento de energia renovável (sem considerar a energia hidrelétrica) foram a China, os Estados Unidos da América e a

¹⁰ Iniciativa dos Estados Unidos da América para o estudo e desenvolvimento de microrredes.

Alemanha, seguidos da Itália, Espanha, Japão e Índia (ALI *et al.*, 2017). Na Figura 1 é possível visualizar a capacidade instalada de energia renovável dos países líderes.

Figura 1 - Principais países com capacidade instalada de energia renovável



Fonte: Adaptado de Ali *et al.* (2017).

Mais de 1437 projetos de microrredes com cerca de 13 GW de capacidade estão sendo propostos, planejados, em construção ou em operação no mundo (RESEARCH, 2015).

Diversas são as dificuldades da inserção de microrredes na rede de distribuição – problemas técnicos, econômicos e regulatórios. Os principais problemas técnicos estão relacionados à estabilidade de tensão (JABRI *et al.*, 2015), interconexão da microrrede à rede de distribuição (JOSHI; DHAMAL, 2015), operação do sistema de distribuição (ZHANG; ZHAO; HONG, 2015) e controle e proteção (KANNAN; KUMAR, 2013).

Na União Européia (UE), a estrutura do sistema elétrico é centralizada (geração e consumo), na qual implica em desvantagens tanto econômicas, técnicas e ambientais. Não há, atualmente, regulamentações e políticas específicas para a utilização e implantação de GD e microrredes, mesmo com a Comissão Europeia tendo lançado diferentes diretrizes e programas de energias renováveis e microrredes aos estados-membros – há um documento de 2009, intitulado *Smart Grids Task Force*, que propõe recomendações e roteiros para a padronização desse seguimento (ALI *et al.*, 2017). Apesar das diretrizes serem propostas pela UE, os estados-membros são livres para implantá-las e devem adaptá-las de acordo com as suas leis locais. No entanto, essas diferenças são barreiras consideráveis para a inserção de GD e

microrredes, pois cada país possui diferentes níveis de regulamentação. Apesar disso, mais de 60 políticas diferentes foram promulgadas ao longo de uma década e meia pelos estados-membros da UE (ALI *et al.*, 2017).

A matriz energética dos Estados Unidos da América é, tradicionalmente, baseada em combustíveis fósseis. Desde o choque do petróleo, na década de 1970, mudanças significativas foram propostas para reduzir a dependência de suprimento importado de combustíveis e lidar com a redução de emissão de CO₂ (ZHANG; ZHOU; CAO, 2011). Diversas políticas foram definidas desde então como, por exemplo, o *State Policies to Support Renewable Energies* (Políticas Estaduais para Apoiar as Energias Renováveis), a *The Energy Policy Act of 2005* (Lei de Política Energética de 2005), o *Renewable Portfolio Standard* (Padrão de Portfólio Renovável), o *Energy Efficiency Resource Standard* (Padrão de Recursos de Eficiência Energética) e o *Renewable Energy Standard* (Padrão de Energia Renovável) (ALI *et al.*, 2017). Neste último caso, um padrão de política foi introduzida nas empresas de serviços públicos para produzir e vender uma certa quantidade de energia a partir de fontes renováveis (solar e eólica). O padrão estabelece uma meta incremental de 2% a cada ano em 10 anos, resultando em 20% de energia renovável em 2020 (ALI *et al.*, 2017). Atualmente, os Estados Unidos da América detêm cerca de 40% do desenvolvimento de microrredes no mundo (NAVIGANT RESEARCH, 2016) – *The Office of Electricity Delivery and Energy Reliability* (OE) do *U.S. Department of Energy* (DOE) tem investido em P&D para microrredes.

Como entrave, apesar de todas essas metas e políticas, cada estado americano tem suas próprias políticas, padrões e metas da inserção de energia renovável e GD.

No continente asiático, o Japão foi o primeiro país a desenvolver pesquisas relativas a microrredes (2003), tendo financiando diversos projetos por meio da Organização para o Desenvolvimento de Tecnologia Industrial e Novas Energias (NEDO) (MANRÍQUEZ, 2013). No entanto, as pesquisas aumentaram após o acidente da usina nuclear em Fukushima (2011). O Ministério do Meio Ambiente japonês passou a incentivar as tecnologias contra desastres, tendo como uma das alternativas, as microrredes. Outrossim, empresas japonesas têm desenvolvido pesquisas em novas baterias para armazenar grandes quantidades de energia de forma econômica (CASTRO, 2015).

Na China, a energia renovável, a GD e as microrredes são recursos importantes para alavancar a crescente demanda de energia elétrica. No entanto, o governo chinês tem, como prioridade, o incentivo em grande escala para o desenvolvimento e implantação de energia renovável – busca-se alcançar a meta de 15% de energia renovável em 2020 (OFFICE OF ELECTRICITY DELIVERY & ENERGY RELIABILITY, 2003). As políticas estão em fase de desenvolvimento sob a direção da *National Development and Reform Commission* (NDRC), a *China's Center for renewable energy Development* (CRED), a *China National Renewable Energy Centre* (CNREC) e a *National Energy Agency* (NEA) (ALI *et al.*, 2017). No tocante às microrredes, as pesquisas começaram em 2004, principalmente na análise da conexão dos RED e a sua influência na rede de distribuição (WU *et al.*, 2013). Em 2006, o Conselho de Estado chinês definiu as microrredes como uma tecnologia avançada para a GD e passou a constar nos Planos Nacionais de Desenvolvimento de Ciência e Tecnologia para o médio e longo prazo (ZENG *et al.*, 2014).

Comparativamente, nos Estados Unidos da América, as microrredes estão mais interconectadas com as redes de distribuição e são capazes de fornecer serviços auxiliares, além de demonstrações terem apontado a maior capacidade de resiliência em relação às microrredes chinesas (YU *et al.*, 2018).

2.3.2 Regulação de microrredes no Brasil

Segundo o PRODIST¹¹, Módulo 1, uma microrrede é uma “rede de distribuição de energia elétrica que pode operar isoladamente do sistema de distribuição, atendida diretamente por uma unidade de geração distribuída.” (PRODIST, 2018). Apesar de existirem regulamentações para empreendimentos utilizarem a GD, que variam conforme o nível de tensão e potência (PIE, autoprodutor, minigeração e microgeração), o conceito de microrrede não se enquadra em regulações atuais no Brasil e em nenhum dos casos supracitados.

¹¹ Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional.

Inovações regulatórias foram inseridas na GD, tal como "múltiplas UCs" e "geração compartilhada", todavia não podem ser enquadradas em microrredes pois há diversas limitações (BORGES, 2016), como, por exemplo:

- a) Possibilidade de prover serviços à rede de distribuição; Desconexão e operação independente da rede principal;
- b) Comercialização de energia excedente entre os prosumers¹².

A partir da REN 482/2012, os agentes distribuidores de energia foram obrigados a elaborar ou revisar suas normas técnicas para incluírem diretrizes de acesso de micro e minigeradores à rede de distribuição. No entanto, essas diretrizes não se aplicam diretamente a microrredes, tendo como principal problema a não possibilidade de isolar-se da distribuidora em momentos de contingências (blecautes). Essa ação de uma microrrede é vista como um dos maiores benefícios à sociedade (BORGES, 2016). Apesar do PRODIST, Módulo 3, dispor sobre ilhamento¹³ para subsidiar e orientar as distribuidoras de energia, a condição é vetada pelas concessionárias devido aos riscos de segurança das equipes que podem estar trabalhando na manutenção da rede, além de problemas quanto à proteção e à qualidade de energia elétrica (BORGES, 2016).

Algumas tendências comerciais estão surgindo no tocante à comercialização de energia elétrica entre microrredes. Em cenários na qual várias microrredes estão próximas e desconectadas da rede local, as microrredes que apresentam déficits podem comprar a energia das microrredes com excedente e propor um preço. Ademais, pode-se criar um mercado de comercialização de energia entre microrredes para aumentar a concorrência de preços. A competição entre microrredes pode reduzir os preços entre as microrredes com a rede local, pois há redução de perdas durante a transmissão, e os custos tendem a decrescer até um limite que traga um retorno financeiro aceitável. Para isso, é necessária uma regulação para esse tipo de mercado.

¹² Neologismo da língua inglesa que provém da junção de produtor (producer) e consumidor (consumer) de energia elétrica.

¹³ Condição na qual uma parte do SEP é separada e energizada somente por um ou mais sistemas elétricos locais através dos RED associados (IEEE Std 1547, 2018).

Castro (2015) sugere as seguintes regulações para as microrredes:

Classificação de microrredes que garanta legalidade para operação autônoma, formas de comercialização de energia, operação isolada e provimento de serviços;

- a) Criar mecanismo de penalidades a ilhamentos não intencionais;
- b) Definir um mecanismo de “fração renovável” (90%, por exemplo). A microrrede seria vista como um cliente único para alcançar os benefícios referentes às políticas de incentivo de renováveis;
- c) Regulamentar a possibilidade das microrredes instalarem cabos e construção de rede elétrica em vias públicas;
- d) Atrelar a potência de instalação de mini ou microgeração limitada à demanda contratada para evitar capacidade excedente em relação ao consumo;
- e) Incentivar, economicamente, as microrredes para terem sistemas de armazenamento de energia;
- f) Criar mecanismos de tarifas prêmio para vender energia às distribuidoras para ganhos de renda com a geração de energia proveniente das microrredes;
- g) Regulamentar a comercialização no mercado cativo para que as microrredes possam vender energia a seus consumidores, além de ser possível estabelecer um mercado varejista local dentro dos limites geográficos da microrrede (compra/venda de energia entre os prosumers).
- h) Possibilitar aos prossumers a venda de energia no ACL;
- i) Permitir estender a aplicação de remuneração de serviços ancilares às microrredes;
- j) Regulamentar a participação das microrredes em sistema de compensação ou qualquer outra política comercial e que seja vista como uma UC pela distribuidora de energia.

Em abril de 2017, a Enel Distribuidora Ceará e a Enel X¹⁴, em parceria com o condomínio residencial Alphaville Fortaleza, no município de Eusébio, implantou um sistema híbrido de geração e fornecimento de energia à rede de distribuição (solar e fotovoltaico). O projeto-piloto de microrrede é o primeiro no Brasil que visa gerar a própria energia, armazená-la e ainda efetuar a gestão – eficiência energética – através de smartphones, aliando os avanços tecnológicos proporcionados pela IoT.

No condomínio-piloto, a Enel X instalou 96 painéis fotovoltaicos, potência de 24,96 kWp e capacidade de geração de 37,98 MWh de energia por ano. Segundo a empresa, é o suficiente para abastecer 21 casas e deixar de emitir 4,78 toneladas de CO₂. Como é possível utilizar a microrrede de forma autônoma ou conectada à rede elétrica da concessionária, em momentos de operação conectada, a microrrede armazena energia em seus bancos de baterias para ser utilizada à noite. Em modo isolado, a microrrede consegue suprir a energia do condomínio durante pelo menos 1 hora. Na Figura 2 é possível visualizar a microrrede do condomínio Alphaville Fortaleza.

O projeto-piloto mostra a viabilidade da utilização de microrredes, principalmente para estabelecimentos que não podem sofrer de instabilidades da rede elétrica (hospitais, data centers, fábricas, etc.). Ademais, a utilização da IoT torna o cliente um agente ativo do sistema elétrico, tendo controle, em tempo real, da energia consumida (ENEL, 2017).

Figura 2 - Microrrede do condomínio Alphaville Fortaleza.



Fonte: Enel (2017).

¹⁴ Empresa global de energia que alia uma estratégia voltada para a digitalização, a sustentabilidade e a inovação.

2.3.3 Comercialização de energia peer-to-peer em microrredes

Em microrredes conectadas à concessionária de distribuição de energia elétrica, é possível, em momentos de falta de geração, comprar eletricidade da concessionária. De forma similar, em momentos de geração excedente, é possível vendê-la à concessi-onária. Em mercados competitivos com preço horário, uma microrrede com dispositivos de armazenamento pode alterar sua estratégia e adquirir energia da concessionária em momentos de preços mais baixos e utilizar a sua energia armazenada e vice-e-versa.

O comércio Peer-to-Peer (P2P) é baseado em um sistema distribuído que consiste em nós interconectados capazes de se auto-configurar em topologias de rede com a finalidade de compartilhar recursos como conteúdo, ciclos de CPU, armazenamento e largura de banda. O sistema é capaz de se adaptar a falhas e acomodar uma quantidade variável de nós, mantendo aceitáveis a conectividade e o desempenho, sem exigir a intermediação ou suporte de um servidor global ou autoridade central (ANDROUTSELLIS-THEOTOKIS; SPINELLIS, 2004). Traz novas opções para a negociação em um cenário de microrredes, na qual poderá alterar fundamentalmente esse paradigma atual de transação apenas entre as UCs e a concessionária de energia (Long *et al.*, 2017). Os proprietários de UCs podem transacionar energia localmente por meio da compra e venda de energia com os seus vizinhos. Tendo em vista que um dos objetivos de uma microrrede é atender a sua própria demanda, o comércio P2P possibilita as transações de energia a preço de varejo, e o excedente produzido pode ser vendido ao mercado atacadista por meio da conexão com a rede de distribuição. Para que isso ocorra, é preciso definir modelos de negócios para a determinação do preço local de energia, além de quantificar os custos de produção e o compartilhamento dos benefícios (KOIRALA *et al.*, 2016).

Long *et al.* (2017) define três paradigmas de mercado proposto para transações de energia P2P tal como *Bill Sharing* (BS), *Mid-Market Rate* (MMR) e *Auction-based Pricing Strategy* (APS). No entanto, o presente trabalho parte da premissa que os preços foram definidos previamente, tendo em vista o foco na implantação de uma rede Blockchain de energia para transação de energia proveniente de microrredes.

2.4 Smart grids e internet of things

O termo smart grid foi utilizado pela primeira vez no ano de 2005 no artigo “*Toward a smart grid: power delivery for the 21st century*” (AMIN; WOLLENBERG, 2005). Apesar de existirem várias definições para o conceito, há a confluência no tocante ao uso de elementos digitais e de comunicações por parte das redes responsáveis pelo transporte de energia, que possibilitam o envio dos dados adquiridos (sensoriamento) aos centros de operação e controle. Em síntese, o conceito está associado a um sistema de energia elétrica que utiliza a tecnologia da informação para torná-lo mais eficiente (econômica e energeticamente), confiável e sustentável. Para atender ao conceito de smart grid, alguns requisitos básicos devem ser contemplados, tais como:

- a) Os sistemas de transmissão e distribuição precisam ser transparentes e controláveis;
- b) Possuir fontes de energia renovável e GD;
- c) Armazenar energia em ambos os lados do medidor de energia elétrica;
- d) Prover capacidade de resposta à demanda e controle da demanda (MASTERS, 2013).

O aumento dos dispositivos digitais em uma rede de comunicação cria a IoT, onde sensores e atuadores instalados obtêm informações (indicadores) e os envia (compartilha) a plataformas para desenvolver uma “imagem” abrangente do sistema. A IoT é um paradigma de comunicação recente, na qual os objetos do cotidiano são equipados com microcontroladores, transceptores (para comunicação digital) e protocolos adequados, capazes de interagir entre si e com usuários, tornando-se parte integrante da Internet (ATZORI; IERA; MORABITO, 2010). Como resultado, torna a Internet mais abrangente, na qual é possível, de forma fácil, acessar uma variedade de dispositivos (eletrodomésticos, sensores de monitoramento, veículos, medidores de energia elétrica, etc.), para promover o desenvolvimento de diversas aplicações em domínios diferentes. Os ganhos são evidentes, pois possibilita o desenvolvimento e a ampliação de serviços, tanto ao cidadão comum, como às empresas e à administração pública – automação industrial, assistência médica,

gerenciamento inteligente de energia, smart grids, contratos inteligentes, dentre outros (BELLAVISTA *et al.*, 2013).

Para a viabilização de transações financeiras entre microrredes e entre microrredes e a concessionária de distribuição de energia elétrica, é necessária e imprescindível a adoção da IoT – para a medição do excedente de energia gerado pelas UCs – e, conseqüentemente, da incorporação do conceito de smart grids. Uma das vertentes promissoras no tocante à viabilização das transações financeiras – e diretamente ligado à evolução tecnológica da quarta revolução industrial – é a Blockchain, base das atuais criptomoedas.

2.5 Tecnologia blockchain: estado da arte e aplicações no setor elétrico

Nesta seção serão apresentados a evolução, os conceitos fundamentais da tecnologia Blockchain e a sua relevância, não somente para as transações financeiras, mas para todos os ramos industriais, incluindo o setor de energia elétrica e a IoT.

2.5.1 Contratos inteligentes

O conceito de “contratos inteligentes” tornou-se popular em 1996 após a publicação do artigo “*Smart Contracts: Building Blocks for Digital Markets*” (SZABO, 1996), na revista *Extropy*, de autoria do jurista e criptógrafo Nick Szabo, um dos supostos criadores do bitcoin. Filho de pais húngaros, que fugiram do regime soviético na Hungria do pós-guerra e migraram para os Estados Unidos da América, Szabo frequentou as reuniões do grupo “Cypherpunk” que, na época, reunia criptógrafos, programadores e ativistas da privacidade na Califórnia dos anos 1990. Como a era digital estava em efervescência, o objetivo do grupo era tomar medidas para conter as violações de privacidade, sendo que Szabo ministrava palestras alertando sobre os riscos em um mundo global e digitalizado.

Szabo e os cypherpunks foram influenciados pela filósofa objetivista russa, Ayn Rand – defensora do capitalismo *laissez-faire* –, e pelo economista e filósofo austríaco, Friedrich von Hayek, este ganhador do prêmio Nobel de economia em 1974 por seu trabalho pioneiro na teoria da moeda e flutuações econômicas e pela análise

da interdependência dos fenômenos econômicos, sociais e institucionais (HAYEK; MYRDAL, 1974). Através de Hayek, Szabo percebeu que a livre iniciativa precisava mais que simplesmente a criptografia para garantir a segurança da informação; descobriu que a sociedade humana é baseada em blocos de construção, como, por exemplo, propriedades e contratos, normalmente impostos pelo Estado. Para buscar uma alternativa cibernética pacífica e sem a influência do Estado, esses blocos precisariam ser transferidos para a Internet (ROCHA, 2018).

No artigo de 1996, Szabo previu que a nova era digital mudaria completamente a maneira como as pessoas efetuariam contratos, e que os contratos inteligentes, proposto por ele, trariam quatro aspectos importantes: observabilidade, privacidade, verificabilidade e exigibilidade (GORD, 2016). Esses protocolos de computador seriam responsáveis por facilitar, verificar e infundir digitalmente a negociação ou a execução de um contrato, eliminando qualquer intervenção humana ou a necessidade de um agente intermediador.

A definição de um contrato, segundo Szabo, é "um conjunto de promessas acordadas em uma reunião de mentes que é a maneira tradicional de formalizar um relacionamento". Esses contratos formam a base de uma economia de mercado livre e podem ser úteis, tanto para as relações comerciais, para os casamentos e até para as questões políticas (GORD, 2016). Os contratos inteligentes permitem que ambas as partes envolvidas possam observar o desempenho do contrato acordado, verificar quando foi executado, garantir que apenas os detalhes imprescindíveis para o conclusão serão revelados a ambas as partes, além de eliminar o tempo gasto no policiamento (GORD, 2016). Todavia, o contrato inteligente, definido por Szabo, era apenas a primeira ferramenta imprescindível para os objetivos propostos. A mais importante ainda estava para ser incorporada: o dinheiro eletrônico.

2.5.2 Bit gold

Em um ensaio posterior, intitulado "*Shelling Out: The Origins of Money*" (SZABO, 2002), Szabo descreveu como o dinheiro foi incorporado ao DNA dos seres humanos, hipótese formulada inicialmente por Richard Dawkins (ROCHA, 2018). Analisando as civilizações antigas, ele verificou que os objetos coletados serviam como dinheiro e o excedente permitia que os seres humanos cooperassem entre si

através do comércio. Ademais, Szabo ficou interessado por um sistema bancário livre, no qual bancos privados emitiriam as suas próprias moedas sem vinculação ao Estado, tese amplamente defendida por Hayek. O próprio livre mercado, com isso, escolheria qual dinheiro seria utilizado – apesar da ideia de um sistema bancário parecer estranha à maioria das pessoas atualmente, essa realidade aconteceu nos Estados Unidos da América (SYLLA; KAUFMAN,) e em diversos países até o século XIX.

A teoria do Bit Gold, proposta por Szabo, teve como base a tentativa de replicar as propriedades econômicas do ouro e, concomitantemente, melhorar os aspectos de segurança. Szabo argumentou que, historicamente, o ouro carecia de problemas de segurança, citando eventos históricos, como a pilhagem espanhola dos astecas para adquirir ouro físico através da força. Também, Szabo discutiu as ameaças políticas contemporâneas, tal como a ordem executiva de Franklin D. Roosevelt, em 1933, exigindo que os americanos entregassem parte de seu ouro ao governo federal (MOSKOV, 2018).

A primeira propriedade incorporada ao Bit Gold foi o algoritmo Proof-of-Work (PoW), desenvolvido por Adam Back em um projeto intitulado “Hashcash” (BACK *et al.*, 2007). O algoritmo no sistema Bit Gold codifica uma string (número aleatório) denominado hash. A única maneira de descobrir a hash é criá-la, pois não pode ser calculada e nem prevista. Da mesma forma como o hashcash, definido por Back, o protocolo Bit Gold não aceitou todos os hashes como válidos – o hash correto necessariamente precisa começar com um número pré-definido de zeros. Assim, a natureza imprevisível dos hashes implica tentativa e erro. O hash correto prova, assim, que o seu criador conseguiu realizar os cálculos corretos e se tornou o próximo bloco candidato. Com isso, o protocolo Bit Gold representaria uma cadeia de hashes PoW e um novo “candidato” sempre existiria, sendo o dono que o encontrou (calculou) análogo àquele que extrairia o ouro em uma mina.

Outro aspecto importante do Bit Gold está atrelado ao registro digital, outra ideia defendida por Hayek. Nesses registros, os hashes corretos são atribuídos às chaves criptográficas abertas daqueles que os criaram, sendo possível, assim, transferir as hashes para outras pessoas. O proprietário, para isso, teria que assinar a transação por meio de uma assinatura criptográfica. O clube de propriedades, assim chamado, é um servidor que rastreia a transferência de propriedade dos hashes de

uma chave pública para outra, sendo necessário manter o registro na rede Bit Gold. Essa solução proposta assemelha-se ao banco de dados replicado do conceito de Wei Dai b-money (DAI, 1998). No entanto, Szabo decidiu abandonar o conceito e implementar um sistema de quórum para resolver o problema dos generais bizantinos¹⁵. Analogamente ao sistema de segurança de computador de bordo em aviões, se um dos computadores (minoridade) falhar, o sistema continuará a funcionar como um todo. Apenas no caso em que a maioria dos computadores falhar, o sistema estará vulnerável. O sistema proposto requer que não sejam necessários tribunais e policiais apoiados em um monopólio estatal da violência; a base do sistema é estritamente voluntária (SEKULOVSKIBOJAN, 2018).

A despeito da evolução supracitada, a rede Bit Gold não era completamente invulnerável a ataques cibernéticos – poderia sofrer de ataques Sybil (HANGXIA, 2010), um método no qual os hackers tentam alimentar as vítimas com informações falsas. Porém, Szabo acreditava que, mesmo no caso da maioria dos servidores serem atacados, a minoria honesta restante poderia administrar uma cadeia separada. Assim, os usuários optariam pelos servidores honestos – um exemplo disso é o moderno Ethereum Classic, que é a cadeia original do Ethereum¹⁶ que se recusou a liquidar o contrato inteligente do DAO (SZABO, 2002).

O próximo problema enfrentado por Szabo estava atrelado à inflação. Com a evolução da tecnologia computacional, a geração de novos hashes corretos tornar-se-iam mais fáceis com o tempo. Dessa forma, os hashes não poderiam ser utilizados como dinheiro, pois a propriedade de “raridade” diminuiria e a abundância de hashes reduziria o seu valor. Para resolver esse problema, depois de gerado o hash correto, o indivíduo deveria anexar uma timestamp¹⁷, de preferência através de servidores de

¹⁵ Problema de acordo entre generais de um exército bizantino. Os generais estão separados geograficamente e precisam se comunicar uns com os outros por meio de mensageiros para, de forma unânime, decidir ou não pelo ataque. No entanto, essa situação agrega complexidade devido à presença de traidores (Fedotova; Veltri, 2006). Esse problema é abordado em aulas introdutórias de redes de computadores.

¹⁶ Plataforma descentralizada capaz de executar contratos inteligentes e aplicações descentralizadas utilizando, para isso, a tecnologia Blockchain. Será abordada na subseção 2.5.5.

¹⁷ Cadeia de caracteres com informações da hora ou data que certo evento aconteceu.

tempo diferentes. Como a propriedade de intercambialidade do dinheiro é extramente importante – uma unidade monetária deve ter o valor igual à outra, indiferentemente da data de criação –, Szabo propôs uma segunda camada, na qual os “bancos” combinariam hashes de diferentes períodos de tempo em “pacotes” de valores idênticos, sendo divididos em um número específico de unidades – como exemplo, um pacote de 2016 teria uma quantidade maior de hashes do que um pacote de 2010, mas os valores dos pacotes deveriam ser o mesmo (SEKULOVSKIBOJAN, 2018).

Szabo, em 2008, 10 anos após ter apresentado a sua iniciativa de uma moeda digital, fez a seguinte pergunta: "O Bit Gold demonstrou um mercado experimental, onde terceiros confiáveis são substituídos por um sistema integrado de segurança. Alguém me ajuda a escrever o código?". Ou seja, o Bit Gold, como definido por Szabo, nunca foi implementado. Porém, Satoshi Nakamoto, o criador do Bitcoin, foi inspirado pelo Bit Gold, publicando, no mesmo ano, o seu artigo. Em 2010, Satoshi Nakamoto publicou, no fórum Bitcointalk.org, o seguinte comentário: "Bitcoin é uma implementação da proposta de Wei Dai's b-money, na Cypherpunks de 1998, e da proposta Bitgold, de Nick Szabo.

O Bit Gold é muito semelhante ao Bitcoin. Além de um banco de dados público contendo informações de propriedade e criptografia de chave pública, a cadeia hash PoW é muito parecida com a Blockchain¹⁸ do Bitcoin. A diferença reside, principalmente, no grau de confiança com terceiros (servidores e etiqueta de tempo). O Bitcoin resolveu esse problema de confiança com a PoW sendo ao mesmo tempo um sistema de recompensas e um mecanismo para o alcance de consenso – a cadeia com a maior taxa de hashes é considerada a versão correta do sistema. Além disso, uma política monetária diferente foi definida no Bitcoin: a emissão fixa de moedas não depende do crescimento da taxa de hashes – devido à complexidade dos cálculos com o aumento da Blockchain, a busca por moedas torna-se cada vez mais difícil (SEKULOVSKIBOJAN, 2018).

¹⁸ Tecnologia de registro distribuído que tem como objetivo a descentralização para garantir a segurança das transações. Será explicado mais adiante, na seção 2.5.4

2.5.3 Bitcoin

Apesar da tecnologia Blockchain (cadeia de blocos, em tradução livre) ter sido desenvolvida há algumas décadas, a sua popularidade está inextricavelmente atrelada ao surgimento da moeda virtual (criptomoeda) Bitcoin, em meados de 2008, após a publicação do artigo "*Bitcoin: A peer-to-Peer Electronic Cash System*" (NAKAMOTO, 2008). O Bitcoin funciona como qualquer moeda fiduciária, tal como a Libra, o Dólar, o Real. As principais diferenças residem no fato dela ser virtual – não existe em espécie – e na descentralização, ou seja, não requer intermediários para a consolidação das transações e não está sob a fiscalização e o controle de nenhum país. Em suma, o Bitcoin torna prescindível a existência de bancos e retira o poder dos governos em relação à moeda, sendo este um dos principais motivos de polêmicas na última década.

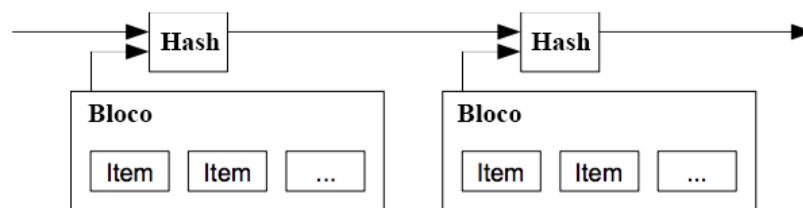
O surgimento da moeda virtual aconteceu em meio à turbulência da crise americana, na qual diversas instituições financeiras foram à falência, em 2008. Nakamoto foi o criador do protocolo original da moeda virtual e o maior contribuidor durante os primeiros anos. Em 2010, Nakamoto desapareceu e diversas teorias têm surgido sobre a sua real identidade. Em 2016, Craig Wright, empreendedor australiano, veio a público afirmando que seria o verdadeiro Nakamoto. No entanto, a comunidade Bitcoin refutou a afirmação e alegou que as provas apresentadas por Wright teriam sido forjadas. De todo modo, a identidade do criador não possui grande relevância, tendo em vista que o sistema por trás da criptomoeda não depende de pessoas ou organizações para funcionar. Em 2018, existiam cerca de 20 milhões de usuários do Bitcoin no mundo e o volume negociado em agosto de 2018 chegou a 830 bilhões de dólares, segundo uma análise de dados feita pelo site Trustnodes, com dados fornecidos pela Coinmetrics (COINMETRICS, 2018).

Nakamoto definiu a moeda virtual como uma cadeia de assinaturas digitais. Cada proprietário efetua uma transferência para outro usuário assinando digitalmente um hash da transação anterior e a chave pública do próximo proprietário e adiciona-os ao final da moeda. No entanto, o beneficiário da moeda não pode verificar se o dono original a comercializou duas ou mais vezes. A solução mais comum baseia-se em uma autoridade central confiável para verificação das transações duplicadas. Mas a intenção do Bitcoin é descartá-la. Assim, é necessário algum mecanismo para

verificar se os proprietários anteriores não assinaram nenhuma transação relativo à moeda comercializada. A forma encontrada por Nakamoto é anunciar publicamente as transações realizadas e definir um sistema em que os participantes concordem em um único histórico da ordem em que foram recebidas as transações (NAKAMOTO, 2008).

A solução proposta começa com um servidor de etiqueta de tempo para que cada transação possa estar conectada umas às outras em uma ordem cronológica. A etiqueta de tempo prova que os dados devem ter existido em um dado momento para que seja inserida no hash. Cada etiqueta de tempo inclui a etiqueta de tempo anterior em seu hash, formando uma cadeia, com cada bloco adicional ajudando e reforçando os anteriores (NAKAMOTO, 2008).

Figura 3 - Etiqueta de tempo e hash.



Fonte: Adaptado de Nakamoto (2008).

O servidor de etiqueta de tempo distribuído em uma base P2P só é possível em um sistema de PoW. Para isso, o Bitcoin utiliza o Hashcash de Adam Back (BACK *et al.*, 2007) envolvendo a verificação de um valor, como no SHA-256¹⁹. A PoW resolve o problema de determinar a representação na tomada de decisão pela maioria dos participantes. Como exemplo, se a maioria fosse baseada em endereços IPs²⁰, facilmente uma pessoa mal intencionada poderia alocar muitos IPs. Por outro lado, com a PoW, cada CPU é a representação de um voto na rede. A decisão da maioria é representada pela cadeia mais longa que possui o maior esforço de PoW. Se a maioria das CPUs for controlada por nós honestos, a cadeia honesta crescerá mais

¹⁹ SHA-256: funções hash criptográficas contendo 32 bytes projetadas pela Agência de Segurança Nacional dos Estados Unidos da América.

²⁰ Rótulo numérico atribuído a cada dispositivo conectado a uma rede de computadores que utiliza o protocolo de Internet para comunicação.

rapidamente e ultrapassará as cadeias concorrentes (NAKAMOTO, 2008). Para modificar um bloco anterior, um invasor teria que refazer toda a PoW do bloco e de todos os próximos blocos e, ainda, alcançar os nós honestos e ultrapassá-los.

Para o correto funcionamento da rede da moeda virtual Bitcoin, são considerados os seguintes aspectos (NAKAMOTO, 2008):

- a) As novas transações são transmitidas para todos os nós da rede; Cada nó coleta as novas transações dentro de um bloco;
- b) Cada nó trabalha para encontrar uma PoW difícil para o seu bloco;
- c) Quando um nó da rede encontra uma PoW, ele a transmite para todos os nós;
- d) Os demais nós aceitam o bloco apenas se todas as transações nele foram válidas e se ainda não tenha sido comercializadas;
- e) Os nós expressam a aceitação do bloco trabalhando na criação do próximo bloco da cadeia, usando, para isso, o hash do bloco aceito como o hash do bloco anterior.

A primeira transação de um bloco do Bitcoin é especial, pois inicia a nova moeda pelo criador. Como não há autoridade central para emitir a moeda, é necessário nós, que, por analogia, podem ser comparados aos mineradores de ouro, que gastam recursos para adicionar ouro à circulação de moeda. No caso do Bitcoin, é o tempo de CPU²¹ e a eletricidade gasta. Em relação ao espaço em disco dos nós: após as transações mais recentes serem enterradas em blocos suficientes, as transações gastas antes dela podem ser apagadas para economizar espaço em disco (NAKAMOTO, 2008). A privacidade também é garantida no Bitcoin, pois as chaves públicas são mantidas de forma anônima. Isto é, apesar de todos poderem ver que alguém está a enviar uma quantidade de moedas virtuais para outra pessoa, não é possível verificar a identidade das partes envolvidas.

A análise feita por Nakamoto em relação à segurança está atrelada à possibilidade de um invasor tentar gerar uma cadeia alternativa mais rapidamente que a cadeia honesta da Blockchain. Mesmo que isso seja possível, não há como criar

²¹ Tempo que o processador gasta executando linhas de código computacional.

valor a partir do nada ou obter algum dinheiro que nunca pertenceu ao invasor, pois os nós da rede não aceitarão transações inválidas como pagamento – o invasor só pode tentar alterar uma de suas transações para receber dinheiro que gastou recentemente (NAKAMOTO, 2008). A corrida entre a cadeia honesta e a cadeia do invasor pode ser caracterizada como uma caminhada aleatória binomial. O evento de sucesso é a cadeia honesta aumentar um bloco (+1) e o evento de falha é a cadeia do invasor ser estendida por um bloco (-1). A probabilidade do invasor se recuperar de um déficit pode ser entendido em analogia ao problema da "Ruína do Jogador"(MEIPING; YANWEI, 2011). Segundo Nakamoto, suponha que um jogador com crédito ilimitado comece com déficit e jogue um número infinito de tentativas para alcançar o ponto de equilíbrio. É possível calcular essa probabilidade do invasor alcançar a cadeia honesta da seguinte forma:

$$\left\{ \begin{array}{l} 1 \text{ se } p \leq q \\ (q/p)^2 \text{ se } p > q \end{array} \right\} \quad (1)$$

Onde:

p: probabilidade de um nó honesto encontrar o próximo bloco

q: probabilidade do invasor encontrar o próximo bloco

qz = probabilidade do invasor recuperar de z blocos anteriores

Tabela 1 - Probabilidade do alcance do invasor em relação aos nós honestos da rede.

z	P
0	1.0000000
1	0.2045873
2	0.0509779
3	0.0131722
4	0.0034552
5	0.0009137
6	0.0002428
7	0.0000647
8	0.0000173
9	0.0000046
10	0.0000012

Fonte: Nakamoto (2008).

De acordo com a suposição de que $p > q$, a probabilidade cai exponencialmente à medida que o número de blocos que o invasor tem que alcançar aumenta (NAKAMOTO, 2008). Se o invasor não der um golpe de sorte ainda no início, as chances tornam-se cada vez menores, pois ele fica a cada momento mais para trás dos nós honestos.

O segundo teste é relativo ao tempo que o destinatário de uma nova transação precisa aguardar antes de ter certeza que o remetente não pode alterar essa transação – sendo o remetente o invasor que tenta fazer com que o destinatário acredite que ele pagou por um tempo e, em seguida, alterou para pagar a si próprio. O destinatário será alertado quando esse evento ocorrer, porém o invasor espera que seja tarde demais e a transação fraudulenta tenha sido efetivada (NAKAMOTO, 2008). Supondo que os nós honestos tenham demorado o tempo médio esperado por bloco, o progresso potencial do invasor será uma distribuição de Poisson:

$$\lambda = z \frac{q}{p} \quad (2)$$

Para calcular a probabilidade do invasor alcançar os nós honestos, multiplica-se a densidade de Poisson para cada quantidade de progresso que poderia ter feito pela probabilidade de alcançar a partir desse ponto:

$$\sum_{k=0}^{\infty} \frac{\lambda^k e^{-\lambda}}{k!} \begin{cases} \left(\frac{q}{p}\right)^z & \text{se } k \leq z \\ 1 & \text{se } k > z \end{cases} \quad (3)$$

Calculando para alguns casos, é possível verificar a probabilidade caindo exponencialmente com o incremento de z (NAKAMOTO, 2008).

O Bitcoin foi o primeiro exemplo de uma moeda digital difundida que provê uma solução para o problema de confiança em sistemas monetários descentralizados. (ASTE; TASCA; MATTEO, 2017). O sucesso do Bitcoin alavancou novas iniciativas e, ao longo da última década, milhares de moedas virtuais foram criadas.

2.5.4 Blockchain

As redes de transações atuais são ineficientes. Os membros de uma rede fazem transações entre si, porém guardam os registros separadamente. A computação apenas transformou os documentos antigos impressos (manuscritos,

datilografados) para discos rígidos e plataformas em nuvem, mantendo o padrão subjacente antigo. As análises das transações pelas entidades centralizadas são dispendiosas e podem levar dias para efetuarem as compensações financeiras, por exemplo. Com a tecnologia atual, é impossível compartilhar informações e processos em um sistema de registro que abarque uma rede de negócios com inúmeros agentes, mesmo que os critérios de visibilidade e confiança sejam transparentes (HYPERLEDGER, 2019). Nesse contexto, a Blockchain é uma alternativa para que os participantes de uma rede de negócios tenham as informações das transações de forma compartilhada (distribuída).

A Blockchain é uma tecnologia de livro-razão distribuído (*Distributed Ledger Technology* – DTL²²) que permite transações de forma descentralizada e ganhou destaque após a criação do Bitcoin, tendo em vista que a Blockchain é o núcleo da criptomoeda. De forma mais simples: a Blockchain pode ser entendida como um livro de registro público imutável, na qual as transações são armazenadas em uma lista de blocos. A cada nova transação, um novo bloco é adicionado ao livro-razão²³. Algoritmos de criptografia e consenso distribuídos foram introduzidos para garantir a segurança das transações.

Devido à característica de sistema distribuído, um ponto de falha não compromete a integridade da Blockchain. Outra definição é dada por Aste *et al.* (2017, p. 1, tradução nossa): "Blockchain é uma tecnologia que usa validação comunitária para manter sincronizados os conteúdos de um livro contábil replicados através de múltiplos usuários.

Após o sucesso do Bitcoin, várias aplicações da tecnologia Blockchain foram vislumbradas, principalmente no tocante a serviços financeiros. Por conseguinte, aplicações diversas foram propostas em outros campos, como, por exemplo, em contratos inteligentes (*smart contracts*) (KOSBA *et al.*, 2016), serviços

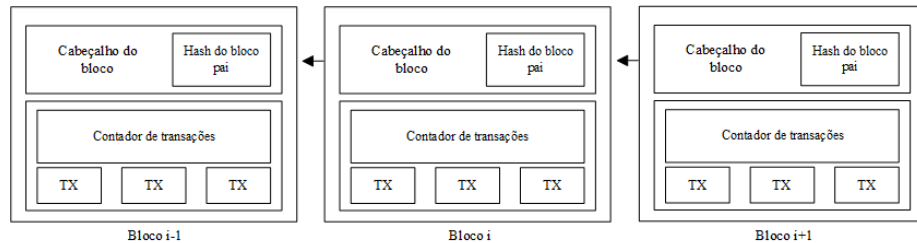
²² Consiste em uma base de dados de transações compartilhada por diversos nós em uma rede de computadores e não está armazenada de forma central.

²³ Um livro-razão, em contabilidade, registra todos os fatos, lançamentos e eventos de uma empresa, de forma sistemática e cronológica, com o intuito de organizar as informações. No decorrer deste trabalho, será utilizada o termo em inglês (ledger).

públicos (ALKETBI; NASIR; TALIB, 2018), IoT (ZHANG; WEN, 2015), sistemas de votação (KSHETRI; VOAS, 2018) e serviços de segurança (SALMAN *et al.*, 2018).

Na Figura 4 é possível visualizar um exemplo de uma Blockchain.

Figura 4 - Blockchain com uma sequência contínua de blocos.

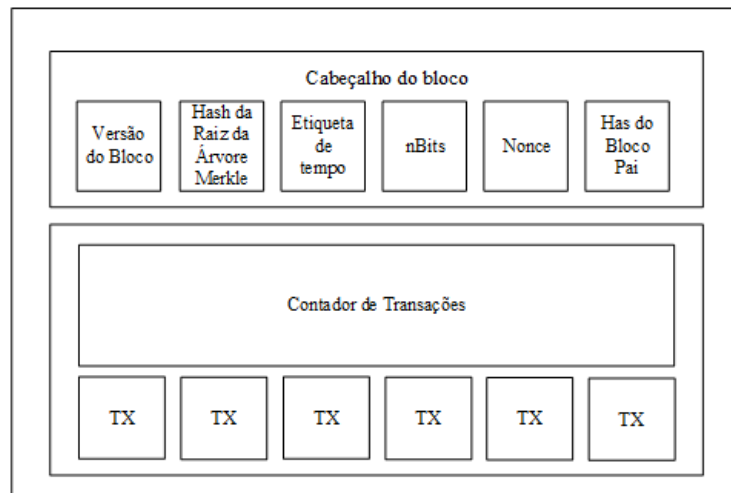


Fonte: Adaptado de Zheng *et al.* (2017).

O primeiro bloco (Bloco i-1) é chamado de genesis block, pois este não possui um bloco pai (prévio). Os blocos posteriores possuem, em seu cabeçalho, o hash do bloco anterior. Ou seja, cada bloco possui apenas um bloco pai, formando assim uma cadeia de blocos (Blockchain).

Na Figura 5 é possível visualizar a estrutura interna de um bloco em separado.

Figura 5 - Estrutura do bloco.



Fonte: Adaptado de Zheng *et al.* (2017).

Há duas divisões: o cabeçalho (header) e o corpo (body) do bloco. No cabeçalho estão inclusos a versão do bloco (conjunto de regras de validação que o bloco deve seguir); o hash da raiz da árvore Merkle (valor hash de todas as transações do bloco); a etiqueta de tempo (hora universal atual desde 1 de janeiro de 1970); os

nBits (número de bits do bloco); o Nonce (campo de 4 bytes que começa normalmente com 0 e aumenta para cada cálculo de hash); e hash do bloco pai (um valor hash de 256 bits que aponta para o bloco predecessor) (ZHENG *et al.*, 2017). O corpo do bloco é composto por um contador de transações e as transações. O número máximo de transações depende do tamanho do bloco e do tamanho de cada transação (ZHENG *et al.*, 2017). Para as transações, a Blockchain utiliza um mecanismo de criptografia assimétrico (assinatura digital) para validá-las (ZHENG *et al.*, 2016).

As principais características da Blockchain são a descentralização, o anonimato, a persistência²⁴ e a auditabilidade, gerando economia e mais eficiência nas transações (ZHENG *et al.*, 2017). Em sistemas convencionais, todas as transações financeiras devem ser feitas de forma centralizada, gerando gargalos de desempenho para os servidores centrais. Na Blockchain, as transações são descentralizadas, eliminando os intermediários (terceiros). O anonimato é garantido através de um endereço público. Cada usuário pode interagir com a Blockchain através desse endereço sem que informações pessoais sejam reveladas a outrem. As transações podem ser validadas de forma mais rápida na Blockchain, pois transações inválidas não são aceitas pelos mineradores. Em teoria, é praticamente impossível excluir ou mesmo reverter transações na Blockchain. A auditabilidade é garantida devido ao armazenamento das transações na Blockchain. A partir do momento que a transação é registrada, estará disponível e pode ser facilmente verificada e rastreada (ZHENG *et al.*, 2017).

A Blockchain evoluiu e, atualmente, a tecnologia é dividida em Blockchain pública, Blockchain privada e Blockchain em consórcio:

- a) Blockchain pública: qualquer pessoa conectada à Internet pode visualizá-la, efetuar transações e também participar do processo de consenso (mineração) para determinar quais blocos são validados e adicionados à Blockchain. Para isso, são utilizados mecanismos como prova de trabalho (PoW) ou prova de participação (PoS), na

²⁴ Em ciência da computação, persistência é um estado que sobrevive ao processo que o criou. Caso contrário, o estado só existiria na memória RAM e seria perdido após a interrupção de seu funcionamento.

qual o grau em que um usuário pode ter influência no processo de consenso é proporcional aos seus recursos. Geralmente, esse tipo de Blockchain é considerado totalmente descentralizado (BUTERIN, 2015);

- b) Blockchain de consórcio: o processo de consenso é controlado por um conjunto pré-selecionado de nós (nodes). Como exemplo, 18 instituições financeiras, cada uma detentora de um nó da rede, sendo que 12 devem assinar cada bloco (transação) para que este seja validado. A leitura dos blocos pode ser pública ou restrita apenas aos participantes do consórcio. Esse tipo de Blockchain é, geralmente, considerado como parcialmente descentralizado (BUTERIN, 2015);
- c) Blockchain privada: as permissões de gravação são mantidas de forma centralizada em uma entidade. A leitura pode ser pública ou restrita a um nível predefinido. Aplicações de gerenciamento de banco de dados, auditoria, etc., internas a uma organização, são alguns exemplos da utilização da Blockchain privada (BUTERIN, 2015).

Em uma Blockchain pública, cada nó pode participar do processo de consenso. Na Blockchain de consórcio, um número selecionado de nós é responsável pelo processo de validação das transações. Em contra partida, na Blockchain privada, uma organização pode determinar e controlar o consenso final. As transações em uma Blockchain pública podem ser visualizada por todos, enquanto isso é limitado em uma Blockchain privada e em uma Blockchain de consórcio. Em uma Blockchain pública é praticamente impossível alterar as transações efetuadas, porém, em uma Blockchain privada e em consórcio pode ser facilmente alteradas, pois há apenas um número limitado de participantes. As transações são mais rápidas em Blockchain privada e em consórcio devido ao número limitado de participantes em relação à Blockchain pública, pois há latência para propagar as transações e blocos em um grande número de nós (ZHENG *et al.*, 2017). Atualmente, tem ganhado destaque, a rede Ethereum e a Hyperledger, por fornecerem ferramentas para a Blockchain em consórcio.

2.5.5 Ethereum

O Ethereum é uma plataforma descentralizada que executa contratos inteligentes e aplicações usando a tecnologia Blockchain, lançada em julho de 2015 por Vitalik Buterin, Gavin Wood e Jeffrey Wilcke. Apesar das semelhanças com o Bitcoin, o Ethereum possui aspectos técnicos diferentes. Enquanto o Bitcoin utiliza sistema de dinheiro eletrônico P2P, a Blockchain do Ethereum disponibiliza uma estrutura para que desenvolvedores criem seus aplicativos descentralizados e os executem. Esse novo paradigma altera a concepção tradicional de aplicativos sendo executados em um único computador. Ademais, a execução descentralizada dos aplicativos garante que estes nunca poderão ser controlados por uma única entidade ou organização. Atualmente, o Ethereum é a segunda criptomoeda com maior valor de mercado e continua sendo alvo de investidores e, por isso, está na frente de seu concorrente, o Hyperledger²⁵.

A rede Ethereum é baseada na EVM (*Ethereum Virtual Machine*). Cada nó da rede possui uma EVM, que executa os complexos algoritmos escritos em linguagens de programação de alto nível, tais como JavaScript e Python. A paralelização ao utilizar a EVM deixa a rede Ethereum mais lenta, porém, a sua execução em cada nó mantém o consenso em toda a Blockchain da rede. Os mineradores trabalham com o intuito de ganhar fichas criptográficas do Ether. Além disso, as fichas também são utilizadas para pagar as taxas de serviços das transações na rede Ethereum (SAJANA; SINDHU; SETHUMADHAVAN, 2018).

O consenso na rede é realizado com a PoW chamada Ethash derivado dos algoritmos Dagger e Hashimoto para mineração dos dados (BUTERIN, 2013). Diferentemente do Bitcoin, o Ethereum, apesar de utilizar o mecanismo PoW, não determina uma quantidade inicial de zeros para a hash. De fato, ao longo dos últimos anos, a rede tem buscado formas mais eficientes de consenso das transações e provavelmente haverá alguma alteração nesse mecanismo. Em 2017, um algoritmo

²⁵ Hyperledger: projeto colaborativo que envolve diversas indústrias mundiais tendo como objetivo suportar ledgers distribuídos baseados na tecnologia Blockchain. Será abordado detalhadamente no Capítulo 3.1

híbrido de PoW e PoS (algoritmo Casper) foi apresentado para validar os blocos, acordos e inserções na Blockchain da rede Ethereum (BUTERIN; GRIFFITH, 2017).

A rede Ethereum tem diferenças significativas também em relação ao Hyperledger no tocante à maneira como são projetados e ao público alvo – apesar de ambas utilizarem o conceito de contratos inteligentes. Na Tabela 2 estão listadas as principais diferenças entre o Ethereum e o Hyperledger Fabric.

Tabela 2 - Comparação entre Ethereum e Hyperledger Fabric.

Característica	Ethereum	Hyperledger Fabric
Descrição	Plataforma genérica de Blockchain	Plataforma modular de Blockchain
Governança	Desenvolvedor Ethereum	Linux Foundation
Modo de operação	Sem autorização, público ou privado	Autorização
Consenso	Mineração baseado em PoW	PBFT
Estado	Banco de dados de valor-chave	Dados da conta
Moeda	Ether	Não há
Recompensa de mineração	Uma recompensa de bloco estático para o bloco vencedor consistindo de exatamente 5,0 Ether	Não há
Transação	Anônima ou privada	Pública ou confidencial
Contrato inteligente	Programação em linguagem Solidity	Chaincode de contrato inteligente
Linguagem de programação	Go, C++, Python	Java, Go
Escalabilidade	Afirmam ser escalável	

Fonte: Adaptado de Sajana *et al.* (2018).

Ethereum, com suas EVMs, executa códigos computacionais publicamente acessíveis a qualquer usuário e tem como objetivo aplicações distribuídas. Por outro lado, o Hyperledger possui uma arquitetura modular que visa à flexibilidade (escalabilidade) com autorização para a sua utilização. O Hyperledger Fabric²⁶ é direcionado para empresas que estão interessadas em agilizar seus processos

²⁶ Um dos projetos da Hyperledger hospedados pela Linux Foundation. Será abordado na seção 3.2.1.

aproveitando a tecnologia Blockchain. Outra diferença reside nos algoritmos de consenso. Enquanto o Ethereum utiliza PoW, o Hyperledger Fabric permite escolher entre não ter consenso ou utilizar PBFT²⁷ (SAJANA; SINDHU; SETHUMADHAVAN, 2018).

A utilização de PoW tem sido relatada como “sugador de energia”, pois os hardwares demandam muita energia elétrica para efetuar os complexos cálculos matemáticos e pode impactar negativamente a praticidade do Ethereum ao longo do tempo – por isso as tentativas de buscar outras formas de consenso, como, por exemplo, o algoritmo híbrido supracitado. Apesar do Ethereum ter sido desenvolvido para ser uma criptomoeda e comumente utilizado para aplicações que utilizem esse recurso, nada impede que a rede seja utilizada para o desenvolvimento de contratos inteligentes privados para negócios empresariais e tudo indica que a rede terá um foco em B2C²⁸ nos próximos anos (TECHRACERS, 2017).

2.5.6 Aplicações da Blockchain no setor elétrico

A tecnologia Blockchain pode tornar-se em breve uma ferramenta de gestão para aplicações no setor de energia elétrica. Entre março de 2017 e março de 2018, startups ao redor do mundo arrecadaram cerca de 300 milhões de dólares para aplicar a tecnologia Blockchain no setor de energia elétrica de diversas formas. Cerca de 75% dos investimentos foram provenientes de ICOs²⁹ e o restante a partir de fundos de capital de risco convencionais (LIVINGSTON *et al.*, 2018). Apesar dos investimentos, as empresas continuam enfrentando sérias barreiras para conseguir comercializar as suas ferramentas desenvolvidas em Blockchain devido, principalmente, à regulamentação.

²⁷ Algoritmo de consenso projetado para funcionar de maneira eficiente em sistemas assíncronos. Tem como objetivo resolver muitos problemas associados às soluções de tolerância a falhas bizantinas. É utilizado principalmente em computação distribuída e Blockchain.

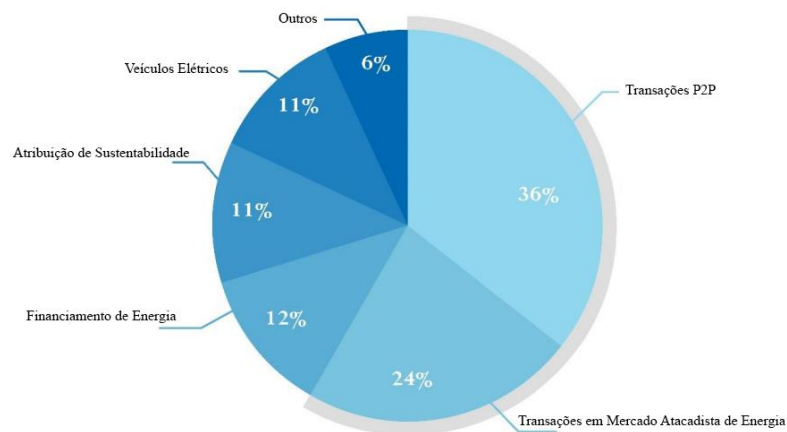
²⁸ Business-to-Consumer: comércio efetuado diretamente entre empresas e o consumidor final sem intermediários.

²⁹ Initial Coin Offering (oferta inicial de moedas) é um meio não regulamentado no qual fundos são criados para o desenvolvimento de um empreendimento em criptomoeda.

Os sistemas de energia elétrica tradicionais ao redor do mundo são fortemente regulamentados e, geralmente, operados de forma centralizada. A *Tokio Electric Power Company* (TEPCO) do Japão e a E.ON, na Alemanha, têm lançado suas próprias iniciativas de Blockchain com parceria das startups. Diversas empresas possuem as suas próprias usinas e comercializam a produção de energia em mercados atacadistas. Outras, todavia, operam redes de transmissão e distribuição e vislumbram a inserção da Blockchain para ajudá-los com a complexidade crescente dos sistemas elétricos. Em face da predominância de empresas estatais, iniciativas da tecnologia Blockchain patrocinadas pelo setor público possuem maior chance de sucesso (LIVINGSTON *et al.*, 2018).

As iniciativas estão presentes em todos os continentes e enfrentarão uma miríade de regimes regulatórios e características de sistemas elétricos que possuem muitos desafios, mas com grandes oportunidades. Na Figura 6 é possível visualizar as duas principais categorias com potencial de aplicação da Blockchain no setor de energia elétrica: transações P2P (36%) e transações em Mercado Atacadista de Energia. (24%).

Figura 6 - Iniciativas da tecnologia Blockchain no setor de energia elétrica por categoria.



Fonte: Adaptado de Livingston *et al.* (2018).

Apesar da tecnologia Blockchain ter sido inicialmente criada para a negociação de criptomoedas, as aplicações na área de energia elétrica são uma promessa e estão divididas em duas categorias: algumas iniciativas tentam criar um novo paradigma para a comercialização de energia enquanto outras buscam melhorar a forma de negociação atual (LIVINGSTON *et al.*, 2018).

Com a crescente inserção de painéis fotovoltaicos em residências, a aplicação mais óbvia da Blockchain é transformar a rede elétrica em uma rede P2P para que os clientes possam transacionar o excedente de eletricidade gerado entre si. Porém, a tendência nos próximos anos é que existirá muita dificuldade para que isso ocorra, face à forte regulamentação do setor elétrico e que, de fato, as UCs continuam a utilizar a rede de distribuição de energia existente e as transações virtuais não alteram o fluxo físico de energia. Apesar disso, diversas iniciativas têm surgido – a Vattenfall (maior empresa nórdica) tem realizado testes utilizando uma Blockchain privada para registrar transações individuais entre UCs com base em baterias distribuídas e painéis fotovoltaicos (LIVINGSTON *et al.*, 2018) e forma menos radical que as transações P2P, outras aplicações de comercialização de energia têm sido exploradas com maior probabilidade de tornarem-se viáveis, tanto pelas concessionárias como pelas autoridades reguladoras: as transações em mercados atacadistas de energia. Como exemplo, a Eneel (grande concessionária de energia elétrica europeia) está liderando um projeto intitulado Enerchain para a utilização da Blockchain para melhorar os atuais mercados atacadistas de energia elétrica (LIVINGSTON *et al.*, 2018). Os proprietários de grandes usinas vendem grandes quantidades para as concessionárias e agentes varejistas, que vendem para os usuários finais. Porém, atualmente, é necessário uma entidade centralizada para mediar cada transação de eletricidade (custo e tempo elevado). Utilizando-se uma rede Blockchain, as transações seriam validadas de forma rápida e muito mais barata e transparente – para todos os participantes – e o mercado atacadista poderia ser ampliado com uma miríade de transações menores (empresas e domicílios poderiam vender seu excedente de GD), que, em um sistema centralizado, acabaria sobrecarregado (LIVINGSTON *et al.*, 2018).

A tecnologia Blockchain pode ser utilizada para a criação de novos mercados de energia que reúnem recursos de GD para auxiliar no equilíbrio da rede elétrica. Os atuais mercados atacadistas definem os preços para grandes blocos de energia, com base na demanda em uma determinada região e na capacidade de transmissão (LIVINGSTON *et al.*, 2018). Porém, em escalas menores (redes de distribuição), não existem mercados que considerem as diferenças instantâneas de demanda entre as UCs ou restrições na capacidade da distribuidora local em atendê-las. Com a queda dos custos da GD (painéis fotovoltaicos, baterias, células a

combustível, etc.) e despacho de forma eficaz, é possível utilizar esses recursos para adiar investimentos em geração e até ajudar a manter a rede de energia elétrica dentro do equilíbrio aos estabilizar parâmetros importantes (frequência e tensão elétrica). Nova Iorque e Austrália estão testando esse tipo de mercado, na qual UCs compram e vendem energia com preços variáveis ao longo do dia. Ademais, as UCs podem servir como suporte para tensão da rede elétrica, dependendo dos sinais de preço e, também, utilizar esses recursos distribuídos e agregá-los (usina virtual) para ajudar o sistema a manter a oferta e a demanda equilibradas, mesmo com a intermitência de energia renovável na rede elétrica. A Blockchain pode auxiliar nesse novo tipo de mercado, pois há muito mais processamento necessário do que em mercados atacadistas tradicionais, além de garantir transações rápidas, baratas, transparentes e seguras (LIVINGSTON *et al.*, 2018).

O uso da tecnologia Blockchain e criptomoedas está revolucionando o financiamento de empreendimentos de energia elétrica. A WePower, por exemplo, é uma startup que está desenvolvendo um projeto na Estônia para levantar fundos para projetos de energia renovável vendendo criptomoedas. Apesar do financiamento ser feito da forma tradicional, uma parcela pequena do financiamento do projeto advém da venda do novo token de criptomoeda da WePower, permitindo que qualquer pessoa possa participar do financiamento de novos projetos de energia renovável. A venda de cada um dos tokens é registrada na Blockchain da empresa, e os compradores tem direito de trocar os seus tokens por eletricidade gerada pelo projeto (DEIGN, 2018).

A *Energy Web Foundation* desenvolveu o aplicativo intitulado Origin que é utilizado para rastrear a geração de eletricidade com base nas emissões de carbono associadas. Com isso, é possível computar, de forma mais precisa, os créditos de compensação de carbono. Antevendo o potencial da aplicação, a Engie, Microsoft e Singapore Power estão participando de projetos-pilotos utilizando o Origin (MILLER; GRIESING, 2018). Outras organizações, como a IBM e a Russian Carbon Fund, também estão desenvolvendo aplicações com Blockchain para registros de emissão de carbono (WALKER, 2017).

A crescente inserção de Veículos Elétricos (VE) ainda sofre barreiras para a sua adoção pelos clientes, principalmente pelo custo e pela falta de infraestrutura pública de carregadores elétricos. Duas startups, eMotorWerks (Califórnia) e

MotionWerk (alemã), com parcerias do setor público, criaram projetos-pilotos para o desenvolvimento de um mercado de carregamento de VEs. As pessoas que possuem carregadores particulares podem alugá-los aos VEs de forma semelhante ao aluguel de um quarto realizado pelo AirBnB³⁰ (LIVINGSTON *et al.*, 2018).

Além das iniciativas supracitadas, a inserção da tecnologia Blockchain tem adentrado à IoT. Como exemplo, a startup Fortum (finlandesa) possui iniciativas para ajudar os clientes de eletricidade a gerenciar uma variedade de dispositivos elétricos conectados à Internet. O consumo dos aparelhos é registrado na Blockchain de acordo com os sinais de preço da rede elétrica com o objetivo de prover informações relevantes para economizar dinheiro ao longo do tempo. No Reino Unido, a OFGEM (*Electricity Regulator Office of Gas and Electricity Markets*) está propondo registrar o consumo de energia verificado pelos medidores em uma rede Blockchain para que os consumidores possam mudar rapidamente de fornecedor de eletricidade no varejo – atualmente, a alteração pode levar até 3 semanas (TRUSTNODES, 2017).

Há, ainda, aplicações com a tecnologia Blockchain sendo desenvolvidas em relação à segurança cibernética dos sistemas de energia elétrica. Uma iniciativa conjunta entre a Siemens e o departamento de energia e defesa dos Estados Unidos da América tem conduzido uma demonstração piloto de algoritmos criptográficos utilizando Blockchain para proteger infraestruturas críticas do setor de energia elétrica (RUUBEL, 2017).

2.5.6.1 LO3: *The Brooklyn Microgrid*

A startup LO3 Energy está desenvolvendo aplicações em Blockchain ao redor do mundo no tocante ao comércio de energia elétrica utilizando o mecanismo P2P. O caso de maior visibilidade é a microrrede no Broklyn, Nova Iorque. A iniciativa conecta milhares de residências em uma microrrede autossuficiente que pode operar desconectada da rede de distribuição em eventuais blecautes ou por consequência de desastres naturais que inviabilizam o fornecimento de energia pela rede principal.

³⁰ Serviço online comunitário para indivíduos alugarem suas casas ou partes (quartos). A plataforma foi lançada em 2008.

Apesar disso, a iniciativa conta, atualmente, com apenas sessenta prosumers. Um número maior de participantes pode virtualmente trocar eletricidade entre si, mas não estão conectados diretamente à microrrede e continuam conectados à rede de distribuição.

Quando dois participantes trocam eletricidade (contrato) através da Blockchain, o fluxo físico de eletricidade continua inalterado – um participante injeta o seu excedente de energia dos painéis fotovoltaicos na rede de distribuição e o outro consome eletricidade da rede de distribuição (LIVINGSTON *et al.*, 2018). Ou seja, os participantes não podem transacionar eletricidade porque há o monopólio da atividade pela concessionária de energia, sendo possível, apenas, comercializar certificados de energia renovável (CARDWELL, 2017).

A L03 Energy precisará convencer os reguladores a permitir a transação de energia entre os participantes do projeto. Devido a esses problemas, a L03 Energy tem procurado parcerias de indústrias ao redor do mundo. No sul da Austrália, por exemplo, firmou uma parceria com o fornecedor de energia local e está trabalhando com o regulador para criar uma plataforma de comercialização de energia similar à microrrede do Brooklyn (LIVINGSTON *et al.*, 2018).

2.5.6.2 *Grid+: wholesale pricing for residential customers*

A startup Grid+ está localizada no Texas, Estados Unidos da América, e tem trabalhado na implementação da tecnologia Blockchain para fornecer aos clientes residenciais, acesso a mercados atacadistas de energia. Geralmente, apenas usinas de energia, distribuidoras e grandes varejistas comercializam grandes blocos de energia e os consumidores residenciais pagam uma tarifa fixa de varejo. O objetivo é que os consumidores residenciais possam estar expostos a preços variáveis e, com isso, otimizem o seu consumo ao longo de um dia.

A Grid+ vende token de criptomoedas para que os consumidores residenciais comprem eletricidade no atacado com as transações (contratos) registrados na Blockchain. Outra vantagem da Grid+: como os clientes precisam pagar antecipadamente pelos tokens para obter energia elétrica no atacado, a empresa é capaz de economizar, enquanto as comercializadoras assumem o risco de crédito dos

clientes que não pagam a fatura após consumir a energia contratada (LIVINGSTON *et al.*, 2018).

2.5.6.3 *Electron: multi-sided flexibility markets*

Com sede no Reino Unido, a Electron está desenvolvendo diferentes aplicações da Blockchain para o setor elétrico. O principal objetivo é criar um mercado flexível de produção e consumo de energia elétrica. Os consumidores residenciais, por exemplo, podem reduzir seu consumo instantâneo de energia por um preço, tal como o mercado de distribuição descrito no subitem 2.5.6. Por exemplo, consumidores em uma comunidade podem desligar seus ar-condicionados e ser compensados através de pagamentos da concessionária de distribuição para reduzir o congestionamento da rede elétrica (LIVINGSTON *et al.*, 2018) – reduzir o consumo local pode ser muito mais barato do que o operador aumentar a potência de uma usina centralizada e que está longe do local congestionado.

A Electron sabe das dificuldades para ganho de escala e aceitação da Blockchain. Por isso, está firmando parcerias com empresas dos mais diversificados seguimentos, tanto concessionárias de serviços públicos como empresas de engenharia (LIVINGSTON *et al.*, 2018). Outrossim, para o mercado ter sucesso, a Electron precisará desenvolver tecnologias além da plataforma em Blockchain, pois esta é apenas a base para facilitar as transações. Há muitos desafios a ser transpassados.

2.5.6.4 *EDP Brasil e Riddle & Code*

A empresa portuguesa EDP, através de suas subsidiárias no Brasil, adotou a tecnologia Blockchain em parceria com a startup austríaca Riddle & Code para efetuar a medição de geração fotovoltaica de UCs. O projeto pioneiro no Brasil está em fase de desenvolvimento e será aplicada em medidores de energia convencionais, sendo possível computar o que foi consumido e injetado na rede da distribuidora – além de facilitar o cálculo para as faturas e impostos. Ou seja, a tecnologia garante a segurança da medição e elimina os custos da instalação de um medidor inteligente (bidirecional).

- a) A solução adotada pela EDP traz diversos benefícios, sendo os principais:
- b) Aprimoramento da gestão da descentralização do fluxo de energia com a conexão dos três agentes envolvidos (distribuidora, consumidor e usina de GD);
- c) Garantia da veracidade, transparência e rastreabilidade dos dados;
- d) Possibilidade do cadastro de clientes e a realização de leitura remota em caso de medidor convencional;
- e) Assegura a escalabilidade e a sustentabilidade de todo o sistema Blockchain (FREIRE, 2018).

Segundo a gestora executiva de inovação da EDP, Livia Brando, a empresa está satisfeita em patrocinar um projeto piloto da tecnologia Blockchain, tendo em vista que tem sido considerada crítica para o futuro do setor elétrico. Ademais, a tecnologia tem o potencial de incentivar a utilização de energia distribuída no Brasil (BELLINI, 2018). A Riddle & Code é a empresa líder na Europa em soluções Blockchain, sendo detentora de diversos prêmios por alavancar soluções tecnológicas (FREIRE, 2018).

3 HYPERLEDGER BLOCKCHAIN

Nesta seção serão apresentados a plataforma Hyperledger da Linux Foundation, o Hyperledger Fabric, seus recursos e os mecanismos de consenso das transações acordadas.

3.1 Hyperledger e Linux Foundation

Com o sucesso do Bitcoin, várias organizações passaram a vislumbrar aplicações com a tecnologia blockchain. Dessas iniciativas, as empresas decidiram criar uma tecnologia blockchain open-source para tornar-se o padrão da indústria mundial. Assim nasceu a Hyperledger.

Hyperledger é um projeto colaborativo, iniciado em 2015 pela Linux Foundation³¹, envolvendo diversas indústrias com o objetivo de facilitar o desenvolvimento de ledgers distribuídos baseados na tecnologia Blockchain. O foco do projeto é o suporte para transações de indústrias globais – tecnológicas, financeiras e logísticas –, porém a sua aplicabilidade pode ser estendida a diversos segmentos que buscam melhorar os aspectos de performance e robustez. Unindo diversas tentativas independentes que buscam desenvolver protocolos e padrões de código aberto, a Hyperledger tornou-se um framework modular para usuários dos mais diversos seguimentos.

No início de 2016, o projeto passou a requisitar e aceitar propostas para bases de código aberto para ser incubadas e com potencial de inclusão como componentes do Hyperledger. As primeiras propostas foram aceitas e dentre elas destacam-se os trabalhos prévios desenvolvidos pela Digital Asset Holdings (Blockstream's libconsensus) e a OpenBlockchain da IBM. Em seguida, o projeto foi renomeado para Fabric. Concomitantemente, o ledger da Intel (Sawtooth) também passou a ser incubado pela Linux Foundation. Os primeiros membros da iniciativa estão vinculados a empresas que trabalham com a tecnologia Blockchain (Blockchain,

³¹ Organização sem fins lucrativos, fundada em 2007, responsável por fomentar o crescimento do Sistema Operacional Linux.

ConsenSys, R3), diversas empresas tecnológicas, tais como a Cisco, Digital Asset Holdings, Fujitsu, Hitachi, IBM, Intel, NEC, NTT DATA, Red Hat, VMware), empresas do setor financeiro (ANZ Bank, ABN AMRO, CLS Group, BNY Mellon, CME Group, Deutsch Börse Group, The Depository Trust & Clearing Corporation (DTCC), J.P. Morgan, SWIFT, Wells Fargo, State Street) e outras (Calastone, Accenture, Credits, Guardtime, IntellectEU, Symbiont) (CLOER, 2016). Atualmente, a Hyperledger possui mais de 230 organizações como membros – da Airbus à VMware –, 10 projetos com 3,6 milhões de linhas de código, 10 grupos de trabalhos ativos e aproximadamente 28 mil participantes com mais de 110 encontros por mês ao redor do mundo (BLUMMER *et al.*, 2018).

3.1.1 Benefícios de softwares de código aberto

Há diversos benefícios em uma tecnologia ser open source (código aberto), das quais se destacam a possibilidade de qualquer entidade ou pessoa efetuar download e visualizar e alterar o código fonte. Alguns exemplos de softwares open source:

- a) Sistema Operacional Linux está instalado em 90% das cargas de trabalho em nuvens públicas (public clouds), em mais de 80% dos smartphones no mundo e em 99% dos supercomputadores (BLUMMER *et al.*, 2018).
- b) Apache é o web server mais popular há cerca de 20 anos e, atualmente, suporta mais de 40% dos *websites* ativos;
- c) MySQL é o banco de dados mais popular;
- d) Firefox é um dos *web browsers* mais utilizados.

Segundo um estudo efetuado pela Oxford Economics, cerca de 80% das empresas entrevistadas estavam a utilizar *software* open source em seus negócios. A pesquisa foi realizada com 100 executivos de negócios do ramo de tecnologia, tais como finanças, órgãos governamentais, varejo e saúde. O fato é que os benefícios dos *software* open source vão além do baixo custo de licenciamento, que por si torna-se um dos motivos para escolhê-los em detrimento dos *software* pagos. Esse modelo apoia o desenvolvimento de novos produtos e serviços e traz uma colaboração mais ativa, tanto dentro das organizações como em comunidades de desenvolvimento.

Ademais, traz agilidade para o desenvolvimento de novas funcionalidades e atualizações, sendo os casos supracitados importantes exemplos de sucesso (ECONOMICS, 2015). Não menos importante é o aspecto de segurança; o open source conta com uma comunidade global que está constantemente verificando vulnerabilidades dos códigos, propondo atualizações e correções a todo momento. Dessa forma, as atualizações não ficam dependentes de apenas uma empresa, que seria a proprietária do código. Por fim, o open source elimina os problemas para as organizações em relação à burocracia; as empresas não sofrem sanções e/ou multas da fiscalização por utilizar, de forma incorreta, *software* sem o pagamento das licenças expiradas ou por meios ilícitos (pirataria).

3.2 Framework Hyperledger

Apesar do Hyperledger ser baseado na tecnologia Blockchain, o framework possui algumas diferenças em relação às redes Blockchain do Bitcoin e Ethereum:

- a) É uma rede permissionária, pois os usuários precisam de autorização para realizar as transações na rede;
- b) Não há processo de mineração para validar as transações – utiliza módulos de consenso;
- c) As transações são confidenciais (privadas).

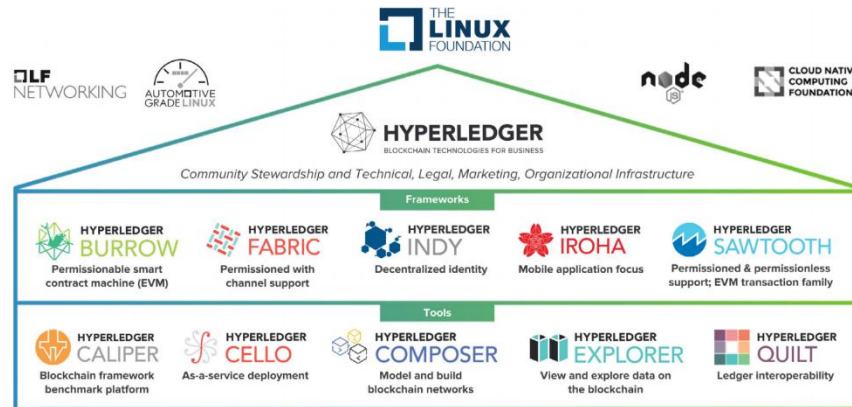
Apesar do Hyperledger poder ser utilizado em diversas indústrias e seguimentos, o principal foco são os setores de finanças, saúde, *Supply Chain* e IoT. Atualmente, a iniciativa possui diversos projetos (tipos) de Hyperledger:

- a) Hyperledger Burrow;
- b) Hyperledger Caliper;
- c) Hyperledger Cello;
- d) Hyperledger Composer;
- e) Hyperledger Explorer;
- f) Hyperledger Fabric;
- g) Hyperledger Indy;
- h) Hyperledger Iroha;
- i) Hyperledger Quilt;

- j) Hyperledger Sawtooth;
- k) Hyperledger Ursa.

Na Figura 7 é possível visualizar a *Greenhouse* com os projetos incorporados ao Hyperledger.

Figura 7 - A estrutura (greenhouse) do Hyperledger.



Fonte: Blummer *et al.* (2018).

No presente estudo, optou-se pelo Hyperledger Fabric, pois este módulo possibilita implementações e funcionalidades diversas para contratos inteligentes, inclusive para uma rede de energia elétrica descentralizada.

3.2.1 Hyperledger Fabric

Hyperledger Fabric é um dos projetos em Blockchain da Hyperledger. É a primeira plataforma tecnológica de contabilidade distribuída a suportar contratos inteligentes concebidos em linguagens de uso geral – Java, Go e Node.js –, não gerando demandas adicionais no tocante à aprendizagem de novas linguagens pelas equipes que estão a implementar os contratos inteligentes em Blockchain. Projetada para contextos empresariais, onde os participantes gerenciam suas transações, traz funcionalidades importantes em relação a outras plataformas de contabilidade distribuída e Blockchain. Com uma plataforma modular e configurável, a Hyperledger Fabric permite a inovação, a versatilidade e a otimização para aplicações em uma infinidade de casos de uso na indústria em geral, desde serviços bancários, financeiros, seguros e saúde à entrega de música digital (HYPERLEDGER, 2019).

A plataforma Hyperledger Fabric é permissionária, ou seja, os participantes são conhecidos uns dos outros, mesmo que não confiem entre si – podem ser, por exemplo, concorrentes em um mesmo setor. A rede pode ser operada segundo um modelo de governança baseado na confiança entre os participantes através de um acordo legal para lidar com as disputas (HYPERLEDGER, 2019). Fabric suporta protocolos consensuais para que seja possível personalizar e adequar a plataforma a casos de uso e modelos de confiança específicos. Como exemplo, se a plataforma Fabric é implantada em apenas uma empresa, o protocolo de consenso *Byzantine Fault Tolerance* (BFT)³² pode ser desnecessário, pois pode ocasionar baixo desempenho e redução de produtividade. Nesse caso, o protocolo de consenso *crash fault-tolerant* (CFT)³³ torna-se mais adequado. Se a implantação do Fabric tiver como objetivo o uso descentralizado com várias partes envolvidas, o BFT pode ser necessário.

Os protocolos de consenso, que podem ser definidos pelo Fabric, não requerem uma criptomoeda nativa para trazer incentivos à mineração onerosa ou para executar os contratos inteligentes. Isso reduz drasticamente o risco de ataques e a ausência de mineração criptográfica torna os custos da plataforma próximos aos custos de um sistema distribuído padrão. A combinação do projeto diferenciado e dos recursos tornou a Fabric uma das plataformas com melhor desempenho em processamento e latência da confirmação das transações, além de permitir a privacidade e confidencialidade das transações dos contratos inteligentes (*chaincode*)³⁴ implementados pelos usuários (HYPERLEDGER, 2019).

A tecnologia Fabric também oferece a capacidade de criar canais, na qual os participantes podem criar um ledger separado de transações. Essa opção é

³² Sistema tolerante a faltas bizantinas mantém o seu funcionamento correto apesar do comportamento maligno de alguns dos seus processos (LIMA; GREVE, 2009). É mais complexo que o CFT, pois lida com agentes maliciosos.

³³ Tolerância a falhas é um nível de resiliência, na qual o sistema continua a atingir corretamente o consenso se os componentes falharem.

³⁴ Código programável, escrito na linguagem Go, para ler e atualizar o estado do ledger. Toda a lógica do negócio está dentro do *chaincode*.

importante quando há concorrentes na rede e estes não querem compartilhar as transações que efetuam com clientes ou outras empresas em uma rede B2B³⁵, por exemplo. Se dois participantes da rede formam um canal, nenhum outro terá cópia do ledger desse canal (HYPERLEDGER, 2019).

O Hyperledger Fabric possui um subsistema composto por dois componentes definidos como world state (estado do mundo) e *transaction log* (log de transação). Cada participante da rede possui uma cópia do ledger de todas as redes do Hyperledger Fabric a que pertence, sendo que o world state descrever o estado do ledger temporalmente (banco de dados do ledger) e o transaction log registra todas as transações efetuadas (histórico). Os contratos inteligentes do Fabric são gravados em *chaincode* e podem ser invocados por uma aplicação externa ao Blockchain no momento de interagir com o ledger. O *chaincode*, atualmente, pode ser implementado em Go e Node.js (HYPERLEDGER, 2019).

Fabric foi projetado para permitir que os participantes escolham qual mecanismo de consenso das transações seja estabelecido, pois cada ramo de negócios possui as suas próprias peculiaridades. Atualmente, Fabric suporta mecanismos de consenso SOLO³⁶ e Kafka³⁷.

3.2.1.1 Principais recursos do framework Hyperledger Fabric

A seguir são listados os principais recursos do Hyperledger Fabric:

- a) Ativos;
- b) Chaincode;
- c) Recursos do ledger; Privacidade;
- d) Segurança e serviços de associação;
- e) Consenso.

³⁵ Comércio estabelecido entre empresas.

³⁶ Mecanismos que transmite a transação sem consenso real. Não é recomendado para produção, apenas para testes.

³⁷ Sistema de streaming distribuída tolerante a falhas.

Os ativos podem ser tanto bens tangíveis (imóveis, carros, *hardwares*, etc.) como intangíveis (contratos, patentes, propriedades intelectuais, etc.) e podem ser representados como uma coleção de pares de valores-chave, sendo que as alterações de estado são registradas como transações em um ledger de canal – podem ser definidos em formato binário ou JSON. Para facilmente definir os ativos, basta utilizar a ferramenta Hyperledger Composer (HYPERLEDGER, 2019).

O *chaincode* é um *software* que define um ou mais ativos e fornece as instruções para modificá-los (lógica de negócios). Aplica as regras para leitura ou alteração de pares de valor-chave ou outra informação contida no banco de dados. As funções definidas no *chaincode* são executadas no banco de dados do ledger e inicia a proposta de transação. A execução do *chaincode* resulta em um conjunto de gravação de valor-chave que pode ser enviada à rede e aplicada no ledger (HYPERLEDGER, 2019).

O ledger possui o registro sequencial de todas as transições de estado no Fabric. Essas transições são o resultado de invocações do *chaincode* (transações) enviados pelos participantes da rede. Os principais recursos de um ledger são listados a seguir:

- a) Consultas e atualizações do ledger baseadas em chave, em intervalo e em chaves compostas;
- b) Consultas do ledger utilizando linguagens avançadas, tal como CouchDB; Consultas de histórico (somente leitura);
- c) Transações (chaves/valores) que foram lidos em *chaincode* e transações (chaves/valores) que foram escritas em *chaincode*;
- d) Transações com assinaturas de todos os pares;
- e) Transações são ordenadas em bloco para serem entregues a um serviço requisitante;
- f) Transações validadas com políticas definidas;
- g) Verificação antes de anexar o novo bloco para garantir que os ativos lidos não foram alterados previamente;
- h) Imutabilidade quando uma transação é validada e confirmada;
- i) Canais contendo configurações de políticas e lista de controle de acesso;

- j) Instâncias do *Membership Service Provider*³⁸ (MSP), que permitem que os materiais criptográficos sejam derivados de autoridades com certificações diferentes (HYPERLEDGER, 2019).

O Hyperledger Fabric contém um ledger imutável por canal, além do *chaincode* que pode modificar o estado atual dos ativos. O ledger existe apenas no canal e pode ser compartilhado em toda a rede ou, ainda, pode ser privado – apenas para um conjunto específico de participantes. Neste caso, os participantes criam um canal separado dos demais membros e as transações tornam-se privadas. Em outros cenários, na qual há uma lacuna entre transparência e privacidade, o *chaincode* pode ser instalado apenas nos pares que precisam acessar os ativos para executar leituras e/ou gravações. Quando um subconjunto em um canal precisa manter seus dados de transações de forma confidencial, uma coleção de dados privados é usado para separar esses dados em um banco de dados privado, separado do ledger de canais e só é acessível para o subconjunto autorizado de organizações. Dessa forma, os canais mantêm as transações privadas a partir da rede mais ampla, enquanto as coleções retêm os dados privados entre subconjuntos de organizações do canal (HYPERLEDGER, 2019). Ademais, os valores dentro do *chaincode* podem ser criptografados (parcial ou totalmente) usando algoritmos comuns, tal como AES9, antes de enviar as transações e serem acrescentados aos blocos do ledger. Somente podem ser descriptografados pelo usuário que possui a chave correspondente usada para gerar a criptografia (HYPERLEDGER, 2019).

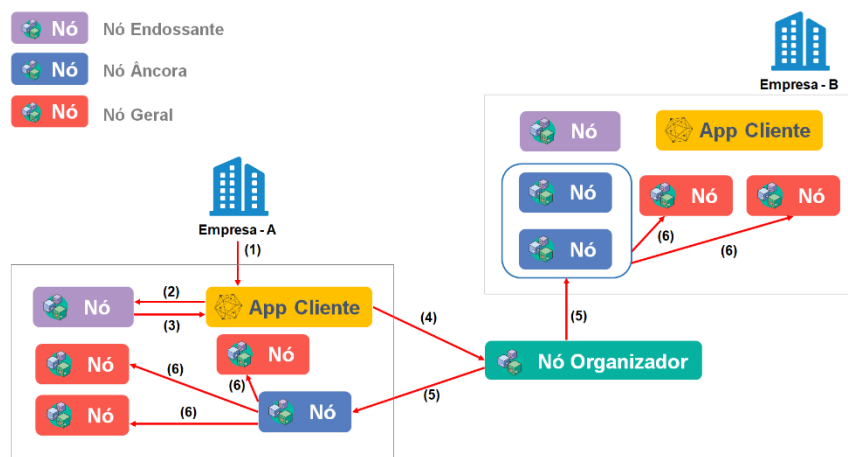
A rede transacional do Fabric não usa o anonimato como base, ou seja, os participantes possuem identidades conhecidas. Porém, a infraestrutura de chaves públicas é usada para gerar certificados criptográficos vinculados às organizações, componentes de rede e usuários ou aplicativos clientes. Dessa forma, o controle de acesso a dados pode ser manipulado e controlado na rede mais ampla e a níveis de canais (HYPERLEDGER, 2019). Esta possibilidade – existência de canais – permitem lidar com cenários em que a privacidade e confidencialidade são requisitos imprescindíveis.

³⁸ Responsável pela criação de identidades digitais para que membros possam participar de um canal.

O consenso é definido como a verificação completa da exatidão de uma transação que compreende um bloco no ledger. É alcançado quando a ordem e os resultados das transações atendem às políticas definidas pelos participantes e ocorre durante o ciclo de vida da transação. As políticas definidas são imprescindíveis, pois definem quais membros específicos devem endossar uma transação. Ademais, o *chaincode* garantem que as políticas adotadas sejam aplicadas e mantidas.

Na Figura 8 tem-se, como exemplo, a definição de uma rede Hyperledger Fabric.

Figura 8 - Rede Hyperledger Fabric.



Fonte: Adaptado de Mamun (2018).

Cada empresa participante da rede Blockchain é responsável por configurar seus nós, que precisam estar apropriadamente criptografados. Esses nós recebem solicitações de transações de clientes dentro da empresa. O cliente pode ser um aplicativo de smartphone ou software da empresa. Esse aplicativo cliente usa o Hyperledger Fabric SDK ou o serviço web REST para interagir com a rede Blockchain. O processo simplificado do fluxo de trabalho de uma solicitação de contrato no Hyperledger Fabric dá-se da seguinte forma:

1. Um participante da Empresa-A invoca uma solicitação de transação com a Empresa-B por meio de um aplicativo cliente;
2. O aplicativo cliente transmite a solicitação de transação para o nó Endossante;
3. O nó Endossante verifica as credenciais do participante e executa o *chaincode* para garantir que as políticas contratuais definidas pelos

participantes foram atendidas. Em seguida, o nó Endossante retornar a aprovação ou rejeição da solicitação de transação ao aplicativo cliente;

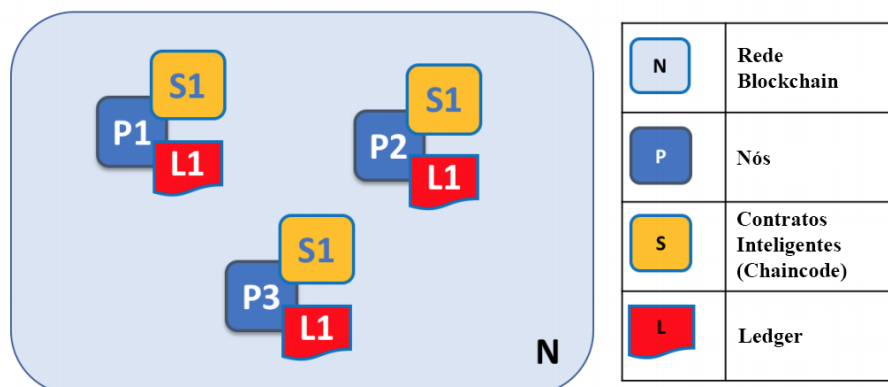
4. O aplicativo cliente envia a transação para o nó Organizador para que seja incluída em um novo bloco;
5. O nó Organizador encaminha o bloco aos nós Âncoras das diferentes empresas que fazem parte da rede Hyperledger Fabric;
6. Os nós Âncoras transmitem o bloco para os outros nós dentro de cada empresa. Esses nós individuais atualizam o ledger local com o bloco mais recente. Dessa forma, todos os nós da rede possuem o mesmo ledger atualizado e sincronizado (MAMUN, 2018).

3.2.1.2 Nós da rede Hyperledger

Os nós (peers) são os elementos fundamentais de uma rede porque hospedam os ledgers e os contratos inteligentes. Os ledgers registram de forma imutável todas as transações efetuadas por contratos inteligentes (*chaincode*). Os contratos inteligentes e os ledgers são utilizados para encapsular os processos compartilhados e disponibilizar informações em uma rede, respectivamente, e são o fundamento de uma rede Hyperledger Fabric (HYPERLEDGER, 2019).

Na Figura 9 é possível visualizar a rede Blockchain e seus componentes de forma simplificada.

Figura 9 - Rede Blockchain resumida.



Fonte: Adaptado de Hyperledger (2019).

A rede Blockchain é composta por nós que podem conter cópias do ledger e cópias dos contratos inteligentes (*chaincode*). A rede N consiste, como exemplo, de nós P1, P2 e P3, na qual cada um mantém sua própria cópia do ledger distribuído. P1, P2 e P3 usam o mesmo *chaincode* S1 para acessar a sua própria cópia do ledger distribuído. (HYPERLEDGER, 2019). Os nós podem ser criados, iniciados, reconfigurados, interrompidos e excluídos a qualquer momento. Possuem um conjunto de APIs para que os administradores da rede e aplicativos cliente interajam com os serviços que eles disponibilizam.

3.2.1.3 Mecanismo de consenso

Para analisar o mecanismo de consenso, será utilizado um cenário com dois clientes (A e B) que vendem e compram rabanetes (HYPERLEDGER, 2019). Cada cliente é um nó da rede por onde enviam suas transações e interagem com o ledger.

Figura 10 - Dois clientes vendendo e comprando rabanetes.



Fonte: Adaptado de Hyperledger (2019).

O cenário assume que o canal está definido e em execução no Fabric. O usuário do aplicativo está cadastrado e se inscreveu com a autoridade de certificação (CA) da organização e recebeu os dados criptográficos para autenticar na rede. O *chaincode* (que representa o estado inicial do mercado de rabanete e possui pares de valores chave) é instalado nos nós e instanciado no canal. O *chaincode* contém a lógica que foi definida para um conjunto de instruções de transação e preço de rabanetes. Uma política de consenso foi acordado entre as partes – as transações só são concluídas após a verificação dos dois nós (HYPERLEDGER, 2019).

Na Figura 11 é possível visualizar a primeira transação iniciada pelo cliente A.

Figura 11 - Cliente A inicia uma transação.



Fonte: Adaptado de Hyperledger (2019).

O Cliente A envia uma requisição de compra de radites, sendo que o pedido tem como alvo o nó A e o nó B, que são representes do Cliente A e do Cliente B. A política estabelecida define que os dois nós devem endossar qualquer transação, portanto, a solicitação vai para os dois nós confirmarem. Por conseguinte, começa a fase de construção da proposta de transação. Um aplicativo aproveita o SDK³⁹ compatível (Node.js, Java, Python) e utiliza uma das APIs disponíveis para gerar uma proposta de transação. Essa proposta é uma solicitação para chamar uma função no *chaincode* para que seja possível ler e/ou gravar os dados. O SDK serve para empacotar a proposta de transação no formato que foi arquitetado, além de usar as credenciais criptográficas do usuário para produzir uma assinatura única para essa proposta de transação (HYPERLEDGER, 2019).

Na Figura 12 consta o processo de verificação da assinatura e do processo de endossamento realizado pelos nós A e B.

³⁹ Conjunto de ferramentas de software que auxilia na criação de aplicativos.

Figura 12 - Processo para endossar e verificar a assinatura da transação pelos nós A e B.



Fonte: Adaptado de Hyperledger (2019).

Os nós A e B endossam que a transação está correta e que não foi submetida anteriormente (proteção contra ataques mal intencionados), que a assinatura é válida e que o Cliente A está autorizado a executar a operação proposta no canal. Os nós aceitam a proposta de transação e invocam, através de funções, o *chaincode*, sendo que este é executado para produzir o resultado da transação com um valor de resposta, um conjunto de leitura e de gravação. Nessa etapa, nenhuma atualização é realizada no ledger. O conjunto desses valores e a assinatura de endosso do Cliente A e B é passado como uma “proposta resposta” ao SDK que analisa a carga útil necessária para o aplicativo utilizar (HYPERLEDGER, 2019).

Através da Figura 13 é possível visualizar a inspeção das respostas da proposta.

Figura 13 - Respostas da proposta são inspeciadas.



Fonte: Adaptado de Hyperledger (2019).

A aplicação verifica as assinaturas dos nós e compara as respostas da proposta para determinar se são as mesmas. Se o *chaincode* apenas consultou o

ledger, normalmente não enviaria a transação ao serviço de pedidos (Ordering Service). Se o cliente pretende enviar a transação ao serviço de pedidos para atualizar o ledger, o aplicativo determina se a política foi cumprida antes da submissão – cliente A e cliente B verificaram e confirmam que a transação está correta (HYPERLEDGER, 2019).

Na Figura 14 é possível verificar o processo para endossar uma transação feita pelo cliente.

Figura 14 - Endosso da transação montada pelo cliente.

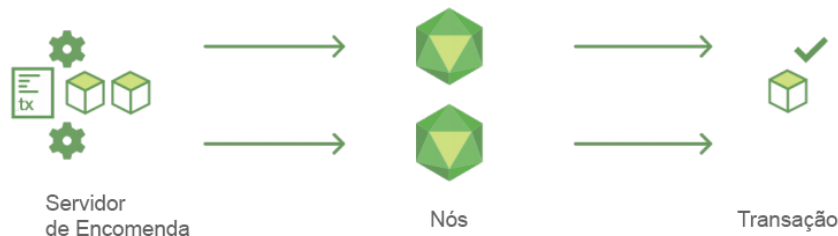


Fonte: Adaptado de Hyperledger (2019).

A aplicação transmite a proposta de transação e encapsula para enviar ao serviço de pedidos. A transação contém o conjunto de leitura/gravação, as assinaturas dos nós e o ID do canal. O serviço de pedidos não precisa inspecionar o conteúdo de uma transação para efetuar a operação, apenas recebe-as de todos os canais da rede, ordena-as de forma cronológica por canal e cria os blocos de transações (HYPERLEDGER, 2019).

Por meio da Figura 15 as transações são validadas pelo serviço de pedidos e confirmadas.

Figura 15 - Transações são validadas e confirmadas.

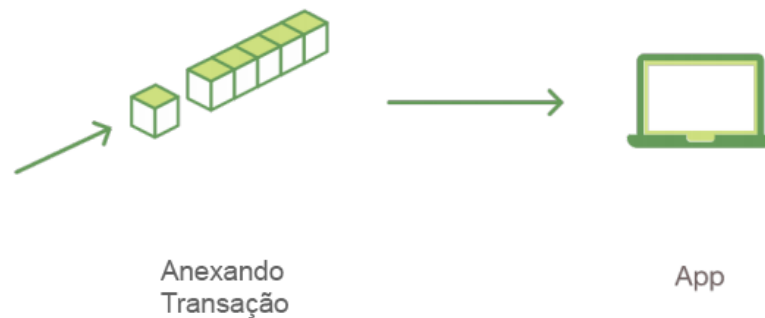


Fonte: Adaptado de Hyperledger (2019).

Os blocos de transações são enviadas a todos os nós do canal, são validadas para garantir as políticas definidas e confirmar que não foram alteradas no ledger previamente. As transações são marcadas como válidas ou inválidas (HYPERLEDGER, 2019).

Por fim, na Figura 16 é possível verificar o último estágio da transação.

Figura 16 - Atualização do ledger.



Fonte: Adaptado de Hyperledger (2019).

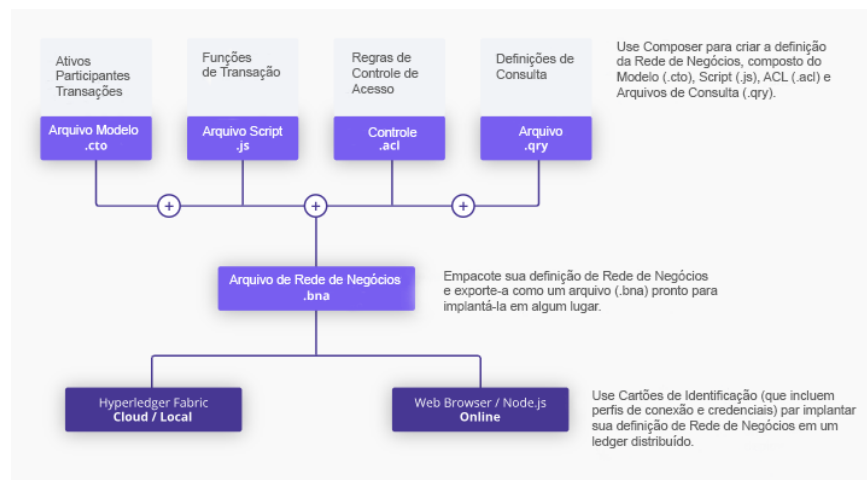
Cada nó anexa a transação ao Blockchain do canal. Um evento é emitido para notificar o aplicativo cliente que a transação foi anexada ao Blockchain e que esta foi validada (HYPERLEDGER, 2019).

3.2.2 Hyperledger Composer

O Hyperledger Composer é um conjunto de ferramentas e estrutura de desenvolvimento open source para facilitar o desenvolvimento de aplicativos de tecnologia Blockchain. Tem como objetivo acelerar a implantação e integração de aplicativos Blockchain aos sistemas de negócios existentes (COMPOSER, 2019). O Composer suporta a infraestrutura e o tempo de execução do Blockchain do Hyperledger Fabric, que possui protocolos de consenso para que as transações sejam validadas com base nas políticas adotadas pelos participantes da rede de negócios.

Aplicações utilizadas no dia-a-dia podem consumir os dados da rede de negócios e entregar aos usuários finais pontos de acesso simples e controlados (COMPOSER, 2019). Na Figura 17 é possível visualizar a estrutura do Hyperledger Composer.

Figura 17 - Estrutura do Hyperledger Composer.



Fonte: Adaptado de Hyperledger (2019).

No Composer são criadas as definições da rede de negócios, na qual contém o modelo (arquivo .cto) – ativos, participantes e transações –, o script (arquivo .js) – funções de transações –, as regras de controle de acesso (arquivo .acl) e as definições de consultas (arquivo .qry). Em seguida, são empacotadas as definições da rede de negócios e exportadas como um único arquivo (.bna) pronto para ser implementado. Os cartões (ID), que incluem perfis de conexão e as credenciais de acesso, são utilizados para implementar a definição da rede comercial em um ledger distribuído, que pode estar em um ambiente em nuvem (cloud computing) ou em servidores locais (COMPOSER, 2019).

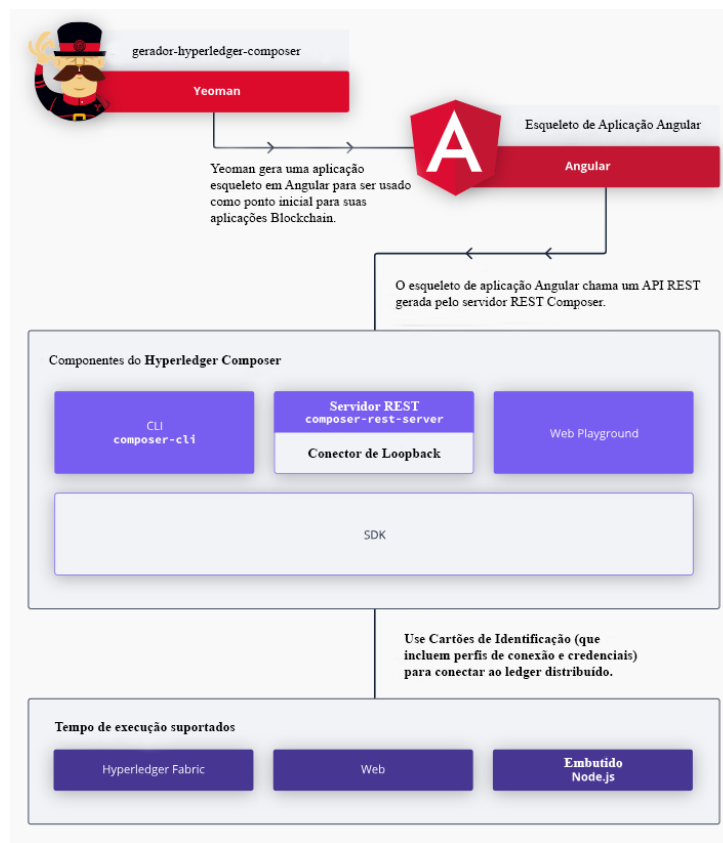
A infraestrutura do Hyperledger Composer possibilita aos desenvolvedores criar rapidamente soluções Blockchain. APIs⁴⁰ REST⁴¹ expõem a lógica de negócios executada na Blockchain para aplicativos Web ou mobile, além de integrar a Blockchain com sistemas corporativos de registros existentes (COMPOSER, 2019).

Através da Figura 18 tem-se a arquitetura típica de soluções do Hyperledger Composer.

⁴⁰ Plataforma que possibilita a integração de um software com sistemas desenvolvidos por terceiros.

⁴¹ Modelo utilizado para projetar arquiteturas de software distribuído com base em comunicação via rede. Foi adotado como modelo a ser utilizado na evolução do protocolo HTTP.

Figura 18 - Arquitetura típica de soluções do Hyperledger Composer.



Fonte: Adaptado de Hyperledger (2019).

Yeoman⁴² gera um aplicativo-base Angular⁴³ para ser utilizado como ponto de partida para o desenvolvimento de aplicações Blockchain. A aplicação-base chama uma API REST gerada pelo servidor Composer REST (COMPOSER, 2019). O Hyperledger Composer possui os seguintes componentes de alto nível: Execution Runtimes, JavaScript SDK⁴⁴, interface de linha de comando, servidor REST, conector LoopBack, Interface de usuário Web (Playground) e gerador de código Yeoman e VSCode⁴⁵ (COMPOSER, 2019).

⁴² Conjunto de ferramentas e bibliotecas para auxiliar a preparação de ambientes de desenvolvimento web.

⁴³ Framework JavaScript, de código aberto, desenvolvido pelo Google para aplicações web, mobile e desktop.

⁴⁴ Conjunto de ferramentas de desenvolvimento de software que fornece tudo o que é necessária para programar em uma plataforma (sistema operacional, aplicação, banco de dados, etc.).

⁴⁵ Editor de código-fonte desenvolvido pela Microsoft.

Como destaque, o Hyperledger Composer Playground disponibiliza uma interface de usuário para configuração, implementação e testes de uma rede comercial. Os recursos avançados permitem que os usuários gerenciem a segurança da rede de negócios, insiram os participantes da rede e conectem as várias redes de negócios Blockchain.

4 ESTUDO DE CASO

Conjunto de ferramentas de desenvolvimento de software que fornece tudo o que é necessária para programar em uma plataforma (sistema operacional, aplicação, banco de dados, etc.).

Neste capítulo busca-se descrever os processos realizados para a implantação de uma rede de transação de energia descentralizada com Hyperledger Composer. Para isso, será simulada a comercialização de energia elétrica entre microrredes baseada no código fonte disponibilizado pela IBM Developer⁴⁶ de autoria de Raheel Zubairy, engenheiro de software da IBM.

4.1 Pré-requisito

A rede de transação de energia descentralizada está baseada no Hyperledger Fabric. Em termos de projeto, definiu-se 3 peers nodes (nós) para hospedar cópias do ledger e o *chaincode*. Os peers estão instalados em servidores Linux Ubuntu (18.04.1 LTS), sendo que 2 representam servidores instalados na concessionária de distribuição e no banco, respectivamente. O terceiro, está instalado em um cloud server, hospedado na IBM Cloud⁴⁷. Conforme a microrrede contemple mais UCs, é possível criar, iniciar, desligar, reconfigurar e até mesmo deletar novos peers da rede.

As cargas de trabalho (execução) são distribuídas através do Docker⁴⁸, que é uma tecnologia de software que fornece contêineres⁴⁹. A seguir constam as demais dependências instaladas e suas versões:

⁴⁶ Comunidade global de programadores.

⁴⁷ Plataforma como serviço (PaaS) de código aberto que possibilita às organizações a criação, implementação e gerenciamento de aplicações em nuvem.

⁴⁸ Fornece uma camada adicional de abstração e automação de virtualização do sistema operacional nas plataformas Windows e Linux.

⁴⁹ Virtualização em nível de sistema operacional que pode executar sistemas Linux ou Windows isolados (contêineres) em um único host de controle.

- a) Docker (18.06.1-ce);
- b) Node⁵⁰ (v8.10.0);
- c) npm⁵¹ (3.5.2);
- d) git⁵² (2.19.0);
- e) Python⁵³ (2.7.15rc1).

4.2 Processo de implantação da rede de comercialização de energia elétrica

Para a implantação da rede de comercialização de energia elétrica utilizou-se como base o código fonte disponibilizado na plataforma GitHub⁵⁴ (ZUBAIRY, 2017b) e codificado os contratos inteligentes de acordo com a política adotada⁵⁵. A seguir constam a sequência de ações necessárias para a instalação da plataforma:

- a) Clone do repositório disponibilizado na plataforma GitHub; Configuração do Hyperledger Fabric;
- b) Geração do Business Network Archive (BNA);
- c) Implantação do arquivo .bna no Hyperledger Fabric; Execução do aplicativo.

O administrador interage com a interface de usuário da rede de comercialização descentralizada através de uma estrutura desenvolvida em Angular; o aplicativo processa solicitações do usuário para a rede através de uma API REST; as solicitações realizadas são inseridas no banco de dados de estado Blockchain no Hyperledger Fabric; a API REST é usada para recuperar o estado da Blockchain; a estrutura Angular obtém os dados com requisições GET para a API REST (ZUBAIRY, 2017a).

⁵⁰ Interpretador de código JavaScript open source.

⁵¹ Gerenciador de pacotes para linguagem de programação JavaScript.

⁵² Sistema de controle de versões de software distribuídos.

⁵³ Linguagem de programação de alto nível.

⁵⁴ Plataforma de hospedagem de código-fonte com controle de versão Git.

⁵⁵ 1 token de energia equivale a 1 kWh; 10 tokens de energia equivalem a R\$ 10,00.

Na Figura 19 é possível visualizar a plataforma on-line para transação de energia elétrica entre microrredes.

Figura 19 - Plataforma para transação de energia elétrica entre microrredes.

Blockchain Microrredes Informações - Participantes - Transações - Ativos -

Bem vindo à Plataforma On-Line de Comercialização de Energia Elétrica entre Microrredes - Blockchain Hyperledger Composer

Esta Aplicação Blockchain demonstra a comercialização de energia elétrica entre 2 (duas) microrredes. Unidades Consumidoras das 2 (duas) microrredes são cadastradas para transacionar energia em um mesmo ambiente blockchain. O mercado de energia é baseado na troca de tokens por energia fornecida. A rede inclui uma Distribuidora de Energia Elétrica para transacionar o excedente ou obter energia, e Bancos para trocar dinheiro por tokens.

Passo 1 - Criar e Atualizar os Participantes da Rede

<p>Unidades Consumidoras possuem 3 ativos: Energia, Moedas e Dinheiro. Eles podem negociar com outras UCs, Bancos e Distribuidoras de Energia Elétrica.</p> <p>Unidades Consumidoras</p>	<p>Bancos na rede possuem 2 ativos: Dinheiro e Moedas. Eles podem negociar com as UCs, que podem comprar ou vender moeda por dinheiro.</p> <p>Bancos</p>	<p>Distribuidoras de Energia possuem 2 ativos: Energia e Moedas. Eles podem negociar com as UCs, que podem comprar ou vender energia por moedas.</p> <p>Distribuidoras de Energia</p>
---	---	--

Passo 2 - Executar Transações

<p>Executar uma transação entre UCs, trocando Moeda por Energia</p> <p>UCs para UCs</p>	<p>Executar uma transação entre uma UC e um Banco, trocando Moeda por Dinheiro.</p> <p>UC para Banco</p>	<p>Executar uma transação entre uma UC e uma Distribuidora de Energia, trocando Moeda por Energia</p> <p>UC para Distribuidora</p>
---	--	--

Fonte: Adaptado de Zubairy (2017).

4.2.1 Caso 1: liquidação de contratos na plataforma com duas microrredes

Para este Caso 1, foram definidas 5 UCs para a microrrede 1 (MR01) e 5 UCs para a microrrede 2 (MR02) – ambas pertencentes a plataforma Hyperledger e ao mesmo canal – e 2 transações de energia, pois há 2 UCs que não possuem geração própria. Na Tabela 3 é possível visualizar as UCs, os proprietários¹¹, as moedas digitais (tokens de energia), a energia medida pelos medidores inteligentes ao longo de um dia e o dinheiro disponível para transações de cada um dos participantes da rede.

Tabela 3 - Cadastro das 10 UCs pertencentes às 2 microrredes do Caso 1.

ID	Proprietário	Moedas	Energia medida [kWh]	Dinheiro [R\$]
UC001-MR01	Fábio Silva	15	2,14	20
UC002-MR01	Alberto Lemos	1	1,91	35
UC003-MR01	Paulo Silva	14	2,73	45
UC004-MR01	João Gomez	20	-9,23	50
UC005-MR01	Pedro Bortoncello	3	2,45	10
UC006-MR02	Claudio Andrade	8	3,05	15
UC007-MR02	Giovanni Lopez	10	1,09	30
UC008-MR02	Andrei Lima	50	-8,63	80
UC009-MR02	Vinicius Spindola	0	1,69	55
UC010-MR02	Marcos Buarque	32	2,80	80

Fonte: Próprio autor (2019).

Na Figura 20 é possível visualizar as 10 UCs que foram cadastradas na Blockchain da plataforma de comercialização de energia.

Figura 20 - UCs das duas microrredes que compõem o sistema.

ID	Nome	Sobrenome	Saldo de Moedas	Energia Medida	Unidade de Energia	Saldo em Dinheiro	Saldo em Moeda	Ações
UC001-MR01	Fábio	Silva	15	2.14	kwh	20	BRL	Atualizar Deletar
UC002-MR01	Alberto	Lemos	1	1.91	kwh	35	BRL	Atualizar Deletar
UC003-MR01	Paulo	Silva	14	2.73	kwh	45	BRL	Atualizar Deletar
UC004-MR01	João	Gomez	20	-9.23	kwh	50	BRL	Atualizar Deletar
UC005-MR01	Pedro	Bortoncello	3	2.45	kwh	10	BRL	Atualizar Deletar
UC006-MR02	Claudio	Andrade	8	3.05	kwh	15	BRL	Atualizar Deletar
UC007-MR02	Giovanni	Lopez	10	1.09	kwh	30	BRL	Atualizar Deletar
UC008-MR02	Andrei	Lima	50	-8.63	kwh	80	BRL	Atualizar Deletar
UC009-MR02	Vinicius	Spindola		1.69	kwh	55	BRL	Atualizar Deletar
UC010-MR02	Marcos	Buarque	32	2.8	kwh	80	BRL	Atualizar Deletar

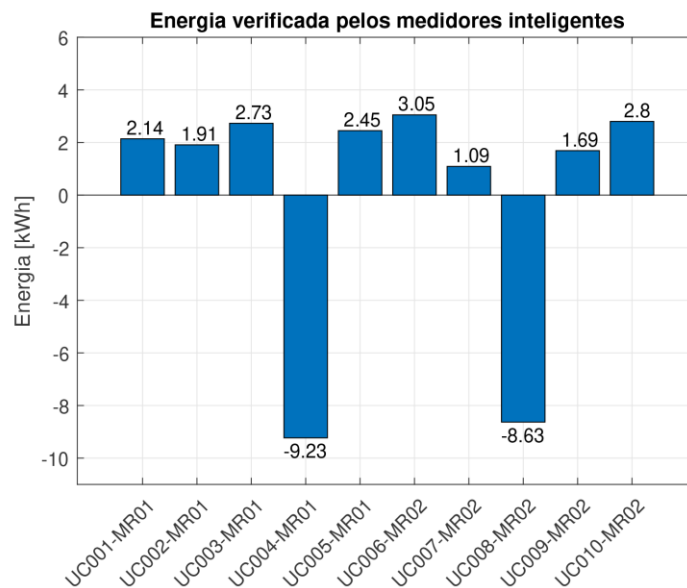
Fonte: Adaptado de Zubairy (2017).

Como exemplo, o ID (identificador) da primeira UC da MR01 foi definido como "UC001-MR01"; o saldo de moedas significa que, inicialmente, a UC possui 15 tokens (moedas virtuais); a energia verificada pelo medidor inteligente foi de 2,14 kWh

no dia; e o saldo de caixa é o montante, em reais, disponível na conta da UC (R\$ 20,00).

Através da Figura 21 tem-se a geração individual de cada UC que compõem a plataformas de comercialização de energia elétrica.

Figura 21 - Geração fotovoltaica das UCs.



Fonte: Próprio autor (2019).

Duas UCs não possuem geração própria (UC004-MR01 e UC008-MR02), sendo que a energia verificada em ambas apresenta valor negativo: -9.23 kWh e -8.63 kWh, respectivamente. Ou seja, a UC004-MR01 consumiu 9.23 kWh e a UC008-MR02 consumiu 8.63 kWh. Dessa forma, é necessário que ambas as UCs comprem energia de outras Ucs que geraram excedente ao longo do dia.

Na plataforma, definiu-se que cada token (moeda virtual) corresponde a 1 kWh. Ou seja, a UC004-MR01 precisa ter, em dinheiro, o valor de R\$ 9,23. Por outro lado, a UC008-MR02 precisa ter disponível R\$ 8,63. Na Figura 20 é possível verificar que ambas as UCs possuem o dinheiro necessário para as transações – saldo de 20 tokens e 50 tokens, respectivamente.

A UC004-MR01 firma 4 contratos para quitar o seu consumo próprio:

- a) Contrato 1: venda de 2,14 kWh da UC001-MR01 para a UC004-MR01;

- b) Contrato 2: venda de 1,91 kWh da UC002-MR01 para a UC004-MR01;
- c) Contrato 3: venda de 2,73 kWh da UC003-MR01 para a UC004-MR01;
- d) Contrato 4: venda de 2,45 kWh da UC005-MR01 para a UC004-MR01.

O somatório de energia gerada pela UC001-MR01, UC002-MR01, UC003-MR01 e UC005-MR01 totaliza o consumo da UC004-MR01 (9,23 kWh). Dessa forma, os 4 contratos foram suficientes para a liquidação do consumo da UC004-MR01.

Como exemplo, tem-se na Figura 22, o Contrato 1 firmado entre a UC001-MR01 (vendedor) e a UC004-MR01 (comprador).

Figura 22 - Transação entre UCs.

Transação entre UCs

Entrar com Informações da Transação

Período de Pagamento: 00:00 - 23:59

Produtor:

Consumidor:

Energia Negociada (kWh):

Taxa de Conversão: **1 Moedas / kWh**

Fonte: Adaptado de Zubairy (2017).

Tendo em vista que os requisitos foram atendidos – saldo em tokens da UC004-MR01 e energia suficientemente gerada pela UC001-MR01 –, a transação é confirmada pela plataforma (Figura 23).

Figura 23 - Transação entre a UC001-MR01 (produtor) e a UC006-MR02 (comprador).

Transação entre UCs

Transação Executada
Período de Pagamento: 00:00 - 23:59
Transação ID: 70f96e9a1507b2187b269e10e681ac141370164321c1966a223790bf755774ae

Fonte: Adaptado de Zubairy (2017).

A segunda transação tem como objetivo adquirir energia para o proprietário da UC008-MR02, pois este também não possui geração própria – o consumo da UC no dia foi de 8,63 kWh.

O somatório de energia gerada pela UC006-MR02, UC007-MR02, UC009-MR02 e UC010-MR02 totaliza o consumo da UC008-MR02 (8,63 kWh). Dessa forma, A UC008-MR02 firma 4 contratos para quitar o seu consumo próprio:

- a) Contrato 1: venda de 3,05 kWh da UC006-MR01 para a UC008-MR02;
- b) Contrato 2: venda de 1,09 kWh da UC007-MR01 para a UC008-MR02;
- c) Contrato 3: venda de 1,69 kWh da UC009-MR01 para a UC008-MR02;
- d) Contrato 4: venda de 2,80 kWh da UC010-MR01 para a UC008-MR02.

Os 4 contratos são suficientes para suprir o consumo da UC008-MR02. Através da Figura 24, é possível visualizar o processo de transação do Contrato 3 entre a UC009 (vendedor) e a UC008-MR02 (comprador).

Figura 24 - Transação entre a UC004-MR01 (produtor) e a UC010-MR02 (comprador).

Transação entre UCs

Entrar com Informações da Transação

Período de Pagamento: 00:00 - 23:59

Produtor:

Consumidor:

Energia Negociada (kWh):

Taxa de Conversão: **1 Moedas / kWh**

Executar Transação

Fonte: Adaptado de Zubairy (2017).

A plataforma Blockchain verifica se a UC009-MR02 (produtor) possui os 1,69 kWh de excedente de energia e se a UC008-MR02 (comprador) possui os tokens necessários para a aquisição (1,69). Como os requisitos foram atendidos, a plataforma grava a nova transação na Blockchain. É possível visualizar através da Figura 25 a confirmação da transação e a criptografia associada.

Figura 25 - Transação entre a UC009-MR02 (produtor) e a UC008-MR02 (comprador).

Transação entre UCs

Transação Executada

Período de Pagamento: 00:00 - 23:59

Transação ID:
`d18ee6d462ac4c1a7840bc68ca2bd2274b3e42358ecc240b8ac0376cbab0a032`

Fonte: Adaptado de Zubairy (2017).

Com os 8 contratos firmados, a liquidação diária das duas microrredes é encerrada e todos as UCs foram atendidas pela geração provida pelos prosumers.

4.2.2 Caso 2: liquidação de contratos entre microrredes e a concessionária de distribuição

Para o Caso 2, tem-se 3 microrredes conectadas à mesma concessionária de distribuição de energia elétrica – 5 UCs da M01, 5 UCs da M02 e 5 UCs da M03. As 3 microrredes e a concessionária fazem parte da rede Hyperledger e do mesmo canal. Em um dia de produção e consumo de energia elétrica, após as UCs terem efetuado as liquidações dos contratos entre si, ainda restou excedente de energia em algumas UCs. Nesse caso, a distribuidora de energia elétrica compra o excedente das UCs superavitárias e compensa-as com tokens de energia, tendo em vista que as microrredes estão conectadas à rede de distribuição. Esses tokens recebidos pelas UCs podem, em seguida, ser trocados por dinheiro (BRL) junto ao banco cadastrado.

Na Tabela 4 é possível visualizar as UCs, os proprietários, os tokens, o excedente de energia e o dinheiro disponível para transações de cada um dos participantes da rede após a liquidação dos contratos entre as UCs.

Tabela 4 - Situação da plataforma de comercialização após a liquidação entre as UCs do Caso 2.

ID	Proprietário	Moedas	Energia medida [kWh]	Dinheiro [R\$]
UC001-MR01	Fábio Andrade	15	0	550
UC002-MR01	Gustavo Silva	23	0	33
UC003-MR01	Breno Oliveira	44	5,43	21
UC004-MR01	Guido Silveira	52	0	15
UC005-MR01	Felipe Stach	5	0	87
UC006-MR02	Mateus Moratelli	11	0	100
UC007-MR02	Jardel Soares	45	0	50
UC008-MR02	Vitor Fagundes	10	8,91	90
UC009-MR02	Marcelo Freiria	21	0	32
UC010-MR02	Humberto Alencar	20	0	50
UC011-MR03	André Vitski	31	0	100
UC012-MR03	Giovani Nunes	8	0	71
UC013-MR03	Jaci dos Santos	132	0	20
UC014-MR03	Rafael Falcão	5	0	48
UC015-MR03	Lucas Schneider	19	0	11

Fonte: Próprio autor (2019).

Na Figura 26 é possível visualizar a situação das 15 UCs da plataforma de comercialização de energia após a liquidação (compra e venda) de energia entre as UCs.

Figura 26 - Situação após a liquidação dos contratos entre as UCs da plataforma.

Blockchain Microrredes								
Informações ▾ Participantes ▾ Transações ▾ Ativos ▾								
Unidades Consumidoras								
Adicionar UC								
ID	Nome	Sobrenome	Saldo de Moedas	Energia Medida	Unidade de Energia	Saldo em Dinheiro	Saldo em Moeda	Ações
UC001-MR01	Fábio	Andrade	15		kwh	550	BRL	Atualizar Deletar
UC002-MR01	Gustavo	Silva	23		kwh	33	BRL	Atualizar Deletar
UC003-MR01	Breno	Oliveira	44	5,43	kwh	21	BRL	Atualizar Deletar
UC004-MR01	Guido	Silveira	52		kwh	15	BRL	Atualizar Deletar
UC005-MR01	Felipe	Stach	5		kwh	87	BRL	Atualizar Deletar
UC006-MR02	Mateus	Moratelli	11		kwh	100	BRL	Atualizar Deletar
UC007-MR02	Jardel	Soares	45		kwh	50	BRL	Atualizar Deletar
UC008-MR02	Vitor	Fagundes	10	8,91	kwh	90	BRL	Atualizar Deletar
UC009-MR02	Marcelo	Freiria	21		kwh	32	BRL	Atualizar Deletar
UC010-MR02	Humberto	Alencar	20		kwh	50	BRL	Atualizar Deletar
UC011-MR03	André	Vitski	31		kwh	100	BRL	Atualizar Deletar
UC012-MR03	Giovani	Nunes	8		kwh	71	BRL	Atualizar Deletar
UC013-MR03	Jaci	dos Santos	132		kwh	20	BRL	Atualizar Deletar
UC014-MR03	Rafael	Falcão	5		kwh	48	BRL	Atualizar Deletar
UC015-MR03	Lucas	Schneider	19		kwh	11	BRL	Atualizar Deletar

Fonte: Adaptado de Zubairy (2017).

A UC003-MR01 e a UC008-MR02 ainda possuem excedente de geração – 5,43 kWh e 8,91 kWh, respectivamente. Por outro lado, a M03 liquidou todos os contratos, sendo que as 5 UCs (UC011-MR03, UC012-MR03, UC013-MR03, UC014-MR03 e UC015-MR03) possuem energia medida nula. Para que a liquidação da plataforma seja completa, é necessário que a concessionária compre o excedente das 2 UCs.

A UC003-MR01 firma um contrato de venda do seu excedente de 5,43 kWh com a concessionária. Na Figura 27 é possível visualizar o contrato de energia sendo proposto.

Figura 27 - Transação entre a Distribuidora de energia e a UC003-MR01.

Transação de UC para Distribuidora

Entrar com Informações da Transação

Taxa: 1 Moeda / kWh

Ação:

Unidade Consumidora:

Distribuidora de Energia:

Valor de Energia (kWh):

Executar Transação

Fonte: Adaptado de Zubairy (2017).

A plataforma verifica a existência de superávit de energia da UC003-MR01 e os tokens disponíveis pela concessionária. Sendo assim, a transação é confirmada e criptografada na Blockchain (Figura 28).

Figura 28 - Executada a transação entre a Distribuidora de Energia e a UC003-MR01.

Transação de UC para Distribuidora

Transação Executada

Intervalo de Tempo: 00:00 - 23:59

Transação ID:
a01cbca28ef175f4f642ee05be2fef4d417fa917d1f8030367ac03264229a455

Fonte: Adaptado de Zubairy (2017).

O segundo contrato é realizado entre a UC008-MR02 e a concessionária de distribuição, pois aquela apresenta um excedente de geração de 8,91 kWh não liquidado. Na Figura 29 é possível visualizar o contrato de energia em proposição.

Figura 29 - Transação entre a Distribuidora e a UC008-MR02.

Transação de UC para Distribuidora

Entrar com Informações da Transação

Taxa: 1 Moeda / kWh

Ação:

Unidade Consumidora:

Distribuidora de Energia:

Valor de Energia (kWh):

Executar Transação

Fonte: Adaptado de Zubairy (2017).A

A plataforma blockchain verifica se a UC008-MR02 possui excedente de energia e se a distribuidora de energia possui saldo de tokens em sua conta. Como os pré-requisitos são atendidos, a transação é confirmada e por ser visualizada na Figura 30.

Figura 30 - Confirmação da transação entre a Distribuidora e a UC008-MR02.

Transação de UC para Distribuidora

Transação Executada

Intervalo de Tempo: 00:00 - 23:59

Transação ID:
ee637a60b5bf62504e95b3ab4b80a740b6c8d6513c1cbc1ca7542ce6a5aecd9b

Fonte: Adaptado de Zubairy (2017).

Na Figura 31 é possível visualizar a situação das 15 UCs após a liquidação dos contratos entre as 2 UCs e a concessionária de energia.

Figura 31 - Situação após a liquidação dos contratos entre as UCs da plataforma.

Blockchain Microrredes								
Informações ▾ Participantes ▾ Transações ▾ Altivos ▾								
Unidades Consumidoras								
Adicionar UC								
ID	Nome	Sobrenome	Saldo de Moedas	Energia Medida	Unidade de Energia	Saldo em Dinheiro	Saldo em Moeda	Ações
UC001-MR01	Fábio	Andrade	15		kwh	550	BRL	Atualizar Deletar
UC002-MR01	Gustavo	Silva	23		kwh	33	BRL	Atualizar Deletar
UC003-MR01	Breno	Oliveira	49.43		kwh	21	BRL	Atualizar Deletar
UC004-MR01	Guido	Silveira	52		kwh	15	BRL	Atualizar Deletar
UC005-MR01	Felipe	Stach	5		kwh	87	BRL	Atualizar Deletar
UC006-MR02	Mateus	Morateili	11		kwh	100	BRL	Atualizar Deletar
UC007-MR02	Jardel	Soares	45		kwh	50	BRL	Atualizar Deletar
UC008-MR02	Vitor	Fagundes	18.91		kwh	90	BRL	Atualizar Deletar
UC009-MR02	Marcelo	Freiria	21		kwh	32	BRL	Atualizar Deletar
UC010-MR02	Humberto	Alencar	20		kwh	50	BRL	Atualizar Deletar
UC011-MR03	André	Vitski	31		kwh	100	BRL	Atualizar Deletar
UC012-MR03	Giovani	Nunes	8		kwh	71	BRL	Atualizar Deletar
UC013-MR03	Jaci	dos Santos	132		kwh	20	BRL	Atualizar Deletar
UC014-MR03	Rafael	Falcão	5		kwh	48	BRL	Atualizar Deletar
UC015-MR03	Lucas	Schneider	19		kwh	11	BRL	Atualizar Deletar

Fonte: Adaptado de Zubairy (2017).

Na Coluna “Energia Medida” não há mais déficit e/ou superávit de energia nas 15 UCs que compõem o sistema. Sendo assim, os contratos foram liquidados e todas as UCs estão regulares na plataforma Blockchain.

4.2.3 Caso 3: transação entre banco e UC e liquidação de contratos entre Ucs de microrredes distintas

Para este Caso 3, são definidas 2 microrredes com 10 participantes (UCs) – 5 UCs para a MR01 e 5 UCs para MR02. O intuito é demonstrar a possibilidade da compra de tokens por dinheiro (BRL), tendo em vista que uma UC não os possui. O banco faz parte da rede Hyperledger e tem autorização para fazer a conversão entre tokens e dinheiro (compra e venda). Somente após a creditação de tokens à UC, a rede Blockchain autoriza a transação de energia com os prosumers superavitários. Além disso, as 2 microrredes e o banco fazem parte do mesmo canal na plataforma.

Na Tabela 5 é possível visualizar as 10 UCs, os proprietários, as moedas (tokens), a energia verificada pelo medidor inteligente e o dinheiro disponível para

transações de cada um dos participantes da rede após terem realizado a liquidação de contratos entre si.

Tabela 5 - Cadastro das 10 UCs pertencentes às 2 microrredes do Caso 3.

ID	Proprietário	Moedas	Energia medida [kWh]	Dinheiro [R\$]
UC001-MR01	Angelo Albino	0	-8,32	1200
UC002-MR01	Fábio Andrade	11	0	232
UC003-MR01	Claudio Azambuja	23	0	25
UC004-MR01	Felipe Vieira	43	0	110
UC005-MR01	Pedro da Silva	88	0	93
UC006-MR02	Mateus Morais	11	0	5
UC007-MR02	Victor Santos	73	0	873
UC008-MR02	Augusto Oliveira	67	-6,15	98
UC009-MR02	Rafael Costa	11	0	50
UC010-MR02	Ayrton Figueiró	40	2,17	145

Fonte: Próprio autor (2019).

Na Figura 32 tem-se as duas microrredes e os 10 participantes (UCs) que compõe a plataforma Blockchain de comercialização de energia.

Figura 32 - UCs das 2 microrredes que compõem o sistema do Caso 3.

Blockchain Microrredes								
Unidades Consumidoras								
ID	Nome	Sobrenome	Saldo de Moedas	Energia Medida	Unidade de Energia	Saldo em Dinheiro	Saldo em Moeda	Ações
UC001-MR01	Angelo	Albino		-8.32	kwh	1200	BRL	Atualizar Deletar
UC002-MR01	Fábio	Andrade	11		kwh	232	BRL	Atualizar Deletar
UC003-MR01	Cláudio	Azambuja	23		kwh	25	BRL	Atualizar Deletar
UC004-MR01	Felipe	Vieira	43		kwh	110	BRL	Atualizar Deletar
UC005-MR01	Pedro	da Silva	88		kwh	93	BRL	Atualizar Deletar
UC006-MR02	Mateus	Morais	11		kwh	5	BRL	Atualizar Deletar
UC007-MR02	Victor	Santos	73		kwh	873	BRL	Atualizar Deletar
UC008-MR02	Augusto	Oliveira	67	6.15	kwh	98	BRL	Atualizar Deletar
UC009-MR02	Rafael	Costa	11		kwh	50	BRL	Atualizar Deletar
UC010-MR02	Ayrton	Figueiró	40	2.17	kwh	145	BRL	Atualizar Deletar

Fonte: Adaptado de Zubairy (2017).

Apenas uma UC permanece deficitária (UC001-MR01) após a liquidação dos contratos entre as microrredes da plataforma. Precisando de 8,32 kWh de energia em um dia típico, o proprietário decide firmar um contrato com o proprietário da UC008

da MR02 e outro contrato com o proprietário da UC010 – também da MR02 –, pois estes possuem um superávit de geração de 6,15 kWh e 2,17 kWh, respectivamente. No entanto, a UC001-MR01 não possui saldo disponível em tokens, sendo indeferida a transação na plataforma Hyperledger. Como o saldo, em dinheiro, da UC001-MR01 é de R\$ 1200,00, esta efetua a compra de tokens junto ao banco cadastrado.

A relação de conversão entre tokens e dinheiro definida na plataforma é de 10:1. Ou seja, para comprar 10 tokens de energia, é necessário desembolsar R\$ 1,0. Precisando de 8,32 tokens de energia, a UC001-MR01 desembolsa R\$ 0,832. Na Figura 33 tem-se a transação realizada entre a UC e o banco.

Figura 33 - Transação entre UC e banco.

Transação de UC para Banco

Entrar com Informação da Transação

Taxa: 10 Moeda / BRL

Ação:

Unidade Consumidora:

Banco:

Valor em Dinheiro (BRL):

Fonte: Adaptado de Zubairy (2017).

Após clicar em "Executar Transação", é requisitado ao Hyperledger Fabric uma nova inserção no ledger. Na Figura 34 tem-se a confirmação da transação e a criptografia gerada.

Figura 34 - Transação entre UC e banco confirmada na Blockchain.

Transação de UC para Banco

Transação Executada

Transaction ID:
1edba9cc30b23eb4571af4d24976be52666dd9b7a484225620c5565ba40eef1

Fonte: Adaptado de Zubairy (2017).

Com a transação confirmada pela plataforma, tem-se o novo saldo de 8,32 tokens da UC001-MR01 (Figura 35).

Figura 35 - Participantes da plataforma após aquisição de tokens pela UC001-MR01.

Blockchain Microrredes Informações ▾ Participantes ▾ Transações ▾ Ativos ▾

Unidades Consumidoras

[Adicionar UC](#)

ID	Nome	Sobrenome	Saldo de Moedas	Energia Medida	Unidade de Energia	Saldo em Dinheiro	Saldo em Moeda	Ações
UC001-MR01	Angelo	Albino	8.32	-8.32	kWh	1199.168	BRL	Atualizar Deletar
UC002-MR01	Fábio	Andrade	11		kWh	232	BRL	Atualizar Deletar
UC003-MR01	Cláudio	Azambuja	23		kWh	25	BRL	Atualizar Deletar
UC004-MR01	Felipe	Vieira	43		kWh	110	BRL	Atualizar Deletar
UC005-MR01	Pedro	da Silva	88		kWh	93	BRL	Atualizar Deletar
UC006-MR02	Mateus	Morais	11		kWh	5	BRL	Atualizar Deletar
UC007-MR02	Victor	Santos	73		kWh	873	BRL	Atualizar Deletar
UC008-MR02	Augusto	Oliveira	67	6.15	kWh	98	BRL	Atualizar Deletar
UC009-MR02	Rafael	Costa	11		kWh	50	BRL	Atualizar Deletar
UC010-MR02	Ayrton	Figueiró	40	2.17	kWh	145	BRL	Atualizar Deletar

Fonte: Adaptado de Zubairy (2017).

Agora, o proprietário da UC001-MR01 está habilitado a comprar energia na rede Hyperledger. Para isso, firma 2 contratos:

- a) Contrato 1: venda de 6,15 kWh da UC008-MR02 para a UC001-MR01;
- b) Contrato 2: venda de 2,17 kWh da UC010-MR02 para a UC001-MR01.

A definição do Contrato 1 – realizada pelo proprietário – pode ser visualizada através da Figura 36.

Figura 36 – Definição do Contrato 1 do Caso 3.

Transação entre UCs

Entrar com Informações da Transação

Período de Pagamento: 00:00 - 23:59

Produtor:

Consumidor:

Energia Negociada (kWh):

Taxa de Conversão: 1 Moedas / kWh

Executar Transação

Fonte: Adaptado de Zubairy (2017).

A plataforma verifica que a UC001-MR01 possui os 6,15 tokens disponíveis para a aquisição e que a UC008-MR02 possui um superávit de 6,15 kWh para venda. Sendo assim, é possível verificar na Figura 37 a transação efetivada pela plataforma e escrita na Blockchain.

Figura 37 - Transação entre a UC001-MR01 (produtor) e a UC006-MR02 (comprador).

Transação entre UCs

Transação Executada

Período de Pagamento: 00:00 - 23:59

Transação ID:
d5a6b99ad4dbd6913cee0b07f2511bb5444698447536d697644038723d8dd68c

Fonte: Adaptado de Zubairy (2017).

Uma nova consulta é realizada na plataforma para verificar os novos saldos dos participantes da rede após a liquidação do Contrato 1 (Figura 38).

Figura 38 - Saldo das UCs do Caso 3 após a liquidação do Contrato 1.

Blockchain Microrredes								Informações ▾	Participantes ▾	Transações ▾	Ativos ▾
Unidades Consumidoras											
Adicionar UC											
ID	Nome	Sobrenome	Saldo de Moedas	Energia Medida	Unidade de Energia	Saldo em Dinheiro	Saldo em Moeda	Ações			
UC001-MR01	Angelo	Albino	2,17	-2,17	kwh	1199,168	BRL	Atualizar	Deletar		
UC002-MR01	Fábio	Andrade	11		kwh	232	BRL	Atualizar	Deletar		
UC003-MR01	Cláudio	Azambuja	23		kwh	25	BRL	Atualizar	Deletar		
UC004-MR01	Felipe	Vieira	43		kwh	110	BRL	Atualizar	Deletar		
UC005-MR01	Pedro	da Silva	88		kwh	93	BRL	Atualizar	Deletar		
UC006-MR02	Mateus	Morais	11		kwh	5	BRL	Atualizar	Deletar		
UC007-MR02	Victor	Santos	73		kwh	873	BRL	Atualizar	Deletar		
UC008-MR02	Augusto	Oliveira	73,15		kwh	98	BRL	Atualizar	Deletar		
UC009-MR02	Rafael	Costa	11		kwh	50	BRL	Atualizar	Deletar		
UC010-MR02	Ayrton	Figueiró	40	2,17	kwh	145	BRL	Atualizar	Deletar		

Fonte: Adaptado de Zubairy (2017).

A energia medida da UC008-MR02 aparece nula, pois os 6,15 kWh foram vendidos à UC001-MR01. O saldo da UC001-MR01 foi subtraído de R\$ 8,32 para R\$ 2,17, pois foram gastos R\$ 6,15 com a aquisição de 6,15 kWh da UC008-MR02. O déficit de energia da UC001-MR01 passou de 8,32 kWh para 2,71 kWh, tendo em vista a aquisição de 6,15 kWh da UC008-MR02.

Por conseguinte, é possível visualizar a definição do Contrato 2 estabelecida pelo proprietário da UC001-MR01 (Figura 39).

Figura 39 - Definição do Contrato 2 do Caso 3.

Transação entre UCs

Entrar com Informações da Transação

Período de Pagamento: 00:00 - 23:59

Produtor:

Consumidor:

Energia Negociada (kWh):

Taxa de Conversão: 1 Moedas / kWh

[Executar Transação](#)

Fonte: Adaptado de Zubairy (2017).

A plataforma verifica que a UC001-MR01 possui os 2,16 tokens disponíveis para a aquisição e que a UC010-MR02 possui um superávit de 2,16 kWh para venda. Dessa forma, é possível verificar na Figura 40 a transação efetivada pela plataforma e escrita na Blockchain.

Figura 40 - Transação entre a UC001-MR01 (produtor) e a UC010-MR02 (comprador).

Transação entre UCs

Transação Executada

Período de Pagamento: 00:00 - 23:59

Transação ID:
43cf8bfa2965393f26b3105aeb4260fe3516ad7d1853d44d7d4d9b0f85c5747d

Fonte: Adaptado de Zubairy (2017).

Após a transação, todas as UCs que compõem a plataforma não possuem mais excedente de energia, sendo que a liquidação foi concluída (Figura 41).

Figura 41 - UCs das 2 microrredes que compõem o sistema do Caso 3.

Blockchain Microrredes								Informações ▾	Participantes ▾	Transações ▾	Ativos ▾
Unidades Consumidoras											
Adicionar UC											
ID	Nome	Sobrenome	Saldo de Moedas	Energia Medida	Unidade de Energia	Saldo em Dinheiro	Saldo em Moeda	Ações			
UC001-MR01	Angelo	Albino			kwh	1199.168	BRL	Atualizar	Deletar		
UC002-MR01	Fábio	Andrade	11		kwh	232	BRL	Atualizar	Deletar		
UC003-MR01	Cláudio	Azambuja	23		kwh	25	BRL	Atualizar	Deletar		
UC004-MR01	Felipe	Vieira	43		kwh	110	BRL	Atualizar	Deletar		
UC005-MR01	Pedro	da Silva	88		kwh	93	BRL	Atualizar	Deletar		
UC006-MR02	Mateus	Morais	11		kwh	5	BRL	Atualizar	Deletar		
UC007-MR02	Victor	Santos	73		kwh	873	BRL	Atualizar	Deletar		
UC008-MR02	Augusto	Oliveira	73.15		kwh	98	BRL	Atualizar	Deletar		
UC009-MR02	Rafael	Costa	11		kwh	50	BRL	Atualizar	Deletar		
UC010-MR02	Ayrton	Figueiró	42.17		kwh	145	BRL	Atualizar	Deletar		

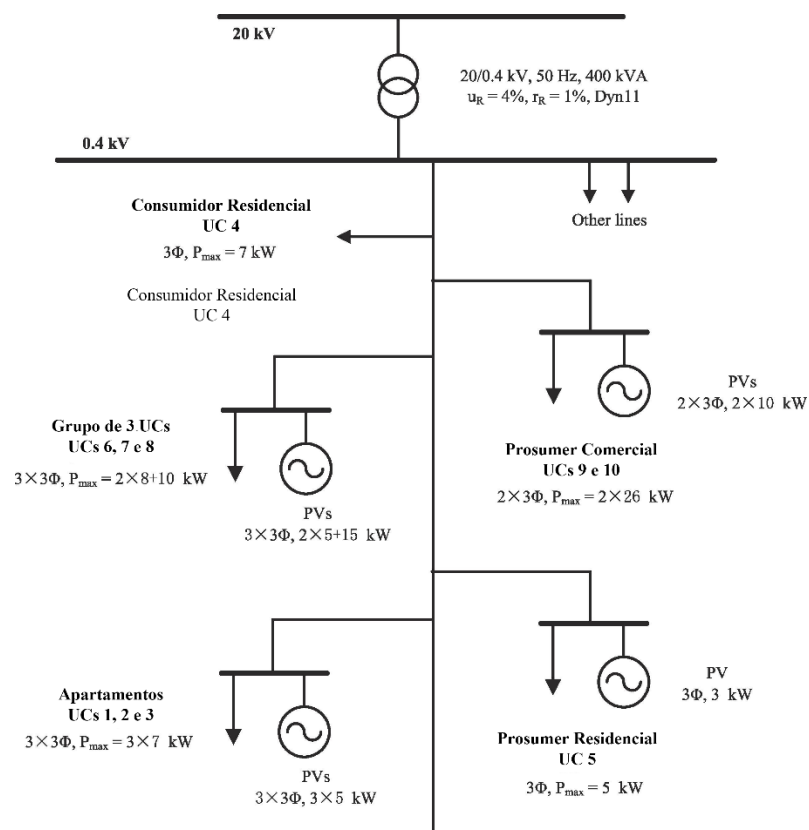
Fonte: Adaptado de Zubairy (2017).

4.2.4 Caso 4: Liquidação de contratos utilizando a Benchmark LV Microgrid

Este Caso 4 é baseado na European LV microgrid benchmark network (microrrede europeia de referência de baixa tensão) (PAPATHANASSIOU *et al.*, 2005). A microrrede faz parte da rede Hyperledger, assim como a concessionária de energia – ambas fazem parte do mesmo canal. Há apenas 1 microrrede com 10 UCs, sendo que apenas a UC04 não possui geração própria. A geração considerada é proveniente de painéis solares instalados nas UCs.

Na Figura 42 é possível visualizar a LV microgrid benchmark utilizada por Zhang *et al.* (2018) e adaptada de Papathanassiou *et al.* (2005).

Figura 42 - Europeia LV microgrid benchmark network.



Fonte: Adaptado de Papathanassiou (2005).

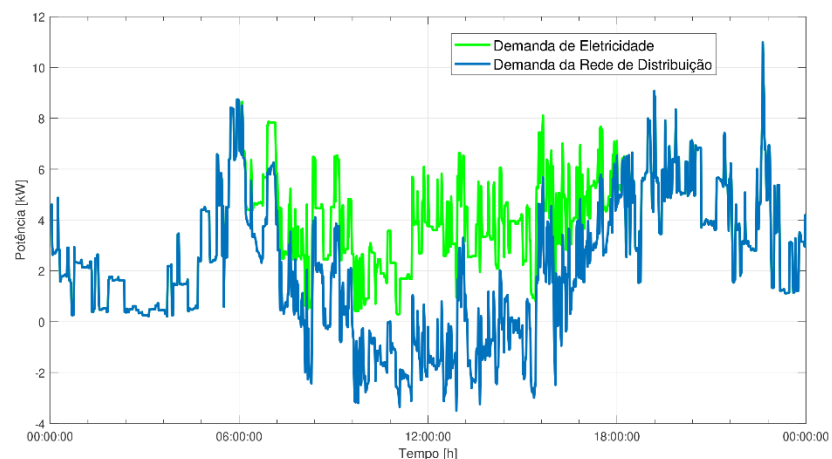
A microrrede possui as seguintes características:

- 1 residência (consumidor) com potência máxima de 7 kW;
- 1 grupo de 3 residências (prosumers) com potência máxima de 26 kW e geração fotovoltaica de 25 kW;

- c) 3 apartamentos (prosumers) com potência máxima de 21 kW e geração fotovoltaica de 15 kW;
- d) 2 estabelecimentos comerciais (prosumers) com potência máxima de 52 kW e geração fotovoltaica de 20 kW;
- e) 1 residência (prosumer) com potência máxima de 5 kW e geração fotovoltaica de 3 kW.

Na Figura 43 tem-se a demanda, em quilowatt, da microrrede (somatório das demandas individuais das UCs) e a demanda de energia proveniente da concessionária de distribuição.

Figura 43 - Demanda de eletricidade e demanda da rede de distribuição ao longo do dia.



Fonte: Próprio autor (2019).

Durante o dia, aproximadamente entre seis horas da manhã e dezoito horas da noite, a demanda de energia das UCs cresce. Nesse período, a demanda requerida da rede de distribuição é menor que a demanda de eletricidade da microrrede, pois os painéis fotovoltaicos compõem uma parcela da geração necessária para atendê-la. Entre dezoito horas da noite e seis horas da manhã, a demanda das UCs é igual a demanda requerida da distribuidora, tendo em vista que não há incidência solar e, conseqüentemente, não há mais geração fotovoltaica.

Na Tabela 6 é possível visualizar as UCs, a energia consumida (iluminação e eletrodomésticos), a geração fotovoltaica, o consumo e o consumo líquido individuais simulados (MCKENNA; THOMSON, 2016).

Tabela 6 - Consumo e Geração da European LV microgrid benchmark network..

ID	Iluminação [kWh]	Eletrodomésticos [kWh]	Geração FV [kWh]	Consumo total [kWh]	Consumo líquido [kWh]
UC01	0,3109	3,0413	7,0588	3,3522	-3,7066
UC02	0,0913	4,1659	0	4,2572	4,2572
UC03	0,8085	14,2068	0	15,0153	15,0153
UC04	0,5774	16,7098	0	17,2872	17,2872
UC05	0,7141	4,0449	5,8813	4,7590	-1,1223
UC06	0,7628	14,4024	0	15,1652	15,1652
UC07	0,5570	8,3756	7,4359	8,9326	1,4967
UC08	0,8285	4,9504	6,5319	5,7789	-0,7530
UC09	0,0794	1,2099	3,9151	1,2893	-2,6257
UC10	0,6969	9,6184	7,1047	10,3153	3,2106

Fonte: Próprio autor (2019).

Os dados de consumo líquido de cada UC são inseridos automaticamente na Blockchain ao final do dia. Dentre os participantes, a UC04 é a que mais possui consumo líquido ao final do dia (17,2872 kWh). Por outro lado, a UC01 possui a maior geração excedente: 3,7066 kWh.

Para a liquidação dos contratos interno à microrrede são gerados 5 Contratos na Hyperledger:

- a) Contrato 1: venda de 3,7066 kWh da UC01 para a UC02;
- b) Contrato 2: venda de 0,5506 kWh da UC05 para a UC02;
- c) Contrato 3: venda de 0,5717 kWh da UC05 para a UC03;
- d) Contrato 4: venda de 0,7530 kWh da UC08 para a UC03;
- e) Contrato 5: venda de 2,6257 kWh da UC09 para a UC03.

A UC01, UC02, UC05, UC08 e UC09, após os contratos firmados na plataforma Hyperledger, possuem consumo líquido zero, tendo em vista que a liquidação entre elas foi concluída. No entanto, ainda há consumo a ser liquidado na UC03, UC04, UC06, UC07 e UC10. Para finalizar a liquidação, a distribuidora de energia elétrica firma 5 contratos de compra de energia elétrica:

- a) Contrato 1: venda de 11,0649 kWh da concessionária DR01 para a UC03;

- b) Contrato 2: venda de 17,2872 kWh da concessionária DR01 para a UC04;
- c) Contrato 3: venda de 15,1652 kWh da concessionária DR01 para a UC06;
- d) Contrato 4: venda de 1,49670 kWh da concessionária DR01 para a UC07;
- e) Contrato 5: venda de 3,21060 kWh da concessionária DR01 para a UC10.

A plataforma verifica que todas as UCs estão habilitadas na rede e que as UCs possui os tokens necessários para a aquisição de energia da concessionária de distribuição. Sendo assim, a liquidação do dia 15 de junho de 2015 é concluída e todas as UCs pertencentes à microrrede atenderam aos requisitos definidos pela rede Blockchain da plataforma Hyperledger.

5 CONCLUSÃO

A Indústria 4.0 – conceito que engloba automação e tecnologia da informação – está em profunda efervescência em diversos setores industriais e de tecnologia que buscam a redução dos custos dos processos produtivos. No setor elétrico, a modicidade tarifária está presente no ordenamento jurídico brasileiro desde 1995 e cada vez mais os agentes são impelidos a reduzir seus custos e garantir os requisitos básicos do fornecimento de energia elétrica. Sendo assim, a adoção de inovações tecnológicas são prementes para o setor elétrico tendo em vista as exigências da legislação e da sociedade.

Atualmente, novos desafios estão surgindo no setor elétrico, principalmente devido à proliferação de fontes renováveis nas redes de distribuição. Em pouco tempo, haverá um percentual substancial de RED no SIN e novas tecnologias são fundamentais para garantir a confiabilidade, a segurança e a qualidade de energia elétrica entregue aos consumidores. Internet of Things, Big Data, Inteligência Artificial, Segurança e Computação em Nuvem são os alicerces dessa revolução tecnológica e terão papel fundamental também para o setor elétrico.

O presente estudo abordou aspectos da inserção de microrredes em diversos países. A falta de padronização e regulamentação nacional, além do alto custo de aquisição dos elementos que compõem uma microrrede e de conhecimento dos aspectos técnicos para a sua operação, são barreiras que precisam ser transpassadas. As regulamentações propostas por Castro (2015) são pontos importantes a serem debatidos pela ANEEL e pelos os agentes do setor elétrico, pois o Brasil precisa acompanhar o desenvolvimento e a implantação de microrredes realizadas em países de vanguarda.

A despeito da regulamentação atual, as microrredes conectadas à rede de distribuição de energia elétrica são realidade e novos estudos continuam em desenvolvimento pela academia. Além dos aspectos técnicos, questões de mercados de energia também precisam ser debatidos. No mundo, há diversas iniciativas de regulamentação de mercados para a comercialização de energia das microrredes, tendo em vista a crescente complexidade da operação que esses mercados exigirão. Startups ao redor do mundo, antevendo um nicho de mercado, têm proposto tecnologias P2P como alternativa para as transações de energia em microrredes. O

principal destaque para esse seguimento é a utilização da Blockchain, que tem tido destaque na última década devido ao êxito das criptomoedas, principalmente através do Bitcoin.

O presente estudo apresentou a implantação e configuração de uma plataforma on-line para a comercialização de energia elétrica entre microrredes. Baseado no Hyperledger (Blockchain) da Linux Foundation, o trabalho teve como objetivo mostrar a viabilidade da utilização da Blockchain para o setor elétrico. Sendo um projeto colaborativo envolvendo diversas indústrias – do ramo de logística à transações financeiras – a Hyperledger conta atualmente com empresas mundiais (IBM, Intel, VMWare, Deutsche Börse Group, J.P. Morgan, etc.), que colaboram constantemente para o desenvolvimento da plataforma. Dessa forma, a tecnologia traz confiança aos agentes do setor e projetos-pilotos devem crescer nos próximos anos.

No cenário nacional, a EDP Brasil tem sido pioneira devido à implantação de um projeto piloto da tecnologia Blockchain em parceria com a Riddle & Code, em 2018. Outrossim, a Empresa de Pesquisa Energética (EPE) em sua Nota de Discussão sobre o crescimento dos RED e os consequentes impactos no planejamento energético (EPE, 2018), cita a Blockchain como uma tecnologia atual para integrar informações locais, oferecendo serviços energéticos a baixo custo com base em smart contracts.

Apesar de todos os desafios que o país tem atravessado nos últimos anos, é imprescindível que a inovação e a tecnologia continuem como foco dos diversos setores da economia nacional, principalmente para alavancar empregos e reduzir custos. Com isso, as empresas tornam-se mais competitivas, eficientes, e os consumidores passam a receber produtos e serviços de qualidade e com preços cada vez menores. Ademais, o Brasil precisa encontrar um novo caminho no tocante à influência excessiva do Estado na economia e no setor elétrico. Subsídios, impostos e encargos setoriais transformaram a tarifa de energia elétrica do país em uma das mais caras do mundo. Inovações tecnológicas e a redução da influência estatal são o alicerce para que o setor elétrico possa incorporar alternativas à geração de energia elétrica centralizada, como é o caso das microrredes conectadas à rede de distribuição de energia elétrica. Os desafios precisam ser avaliados e as soluções mensuradas para que o setor elétrico consiga, efetivamente, entregar uma energia elétrica módica.

Ficam como principais sugestões para trabalhos futuros a ser implementados em uma rede Hyperledger Blockchain:

Algoritmos para estabelecer um mercado de energia local para a microrrede;

Formulação do preço horário da energia elétrica injetada pela microrrede na rede de distribuição;

Mecanismos de leilão para os participantes da microrrede efetuarem a compra e venda de eletricidade;

Um mercado de energia com dois níveis hierárquicos: um de cooperação entre agentes agregadores (microrredes) e outro de comércio P2P entre as UCs de forma a maximizar seus lucros financeiros.

REFERÊNCIAS

- ALEXANDER, R. B. **Aquecimento global**: alarme falso. Rio de Janeiro: Gryphus, p. 201, 2010.
- ALI, A. *et al.* **Overview of current microgrid policies, incentives and barriers in the european union, united states and china**. Sustainability, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 9, n. 7, p. 1146, 2017.
- AMIN, S. M.; WOLLENBERG, B. F. **Toward a smart grid**: power delivery for the 21st century. IEEE Power and Energy Magazine, v. 3, n. 5, p. 34–41, set. 2005. ISSN 1540-7977.
- ANDROUTSELLIS-THEOTOKIS, S.; SPINELLIS, D. **A survey of peer-to-peer content distribution technologies**. ACM computing surveys (CSUR), ACM, v. 36, n. 4, p. 335–371, 2004.
- ANEEL. **Resolução normativa n. 109, de 26 de outubro de 2004**. 2004. Aneel. Acessado em 26 de janeiro de 2019. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2004109.pdf>>.
- ANEEL. **Geração distribuída**. 2015. Acessado em 26 de janeiro de 2019. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/geracao-distribuida>>.
- ANEEL. **Resolução Normativa 687/2015**. 2015. Acessado em 26 de janeiro de 2019. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2015687.pdf>>.
- ARAÚJO, M. A.; KLEIN, P. M.; MÖRNER, N.-A. **Basic science of a changing climate**. In: INDEPENDENT COMMITTEE ON GEOETHICS. Porto Conference Volume 2018 Revisited. Via Panorâmica Edgar Cardoso, 4150-564 Porto, Portugal, 2018. p. 94.
- ASSUNÇÃO, T. N.; TAKAMATSU, R. T.; BRESSAN, V. G. F. **Os impactos da medida provisória 579 nos retornos das ações de companhias de energia elétrica**. Revista de Gestão, Finanças e Contabilidade, v. 5, n. 2, p. 38–53, 2015.
- ASTE, T.; TASCA, P.; MATTEO, T. D. **Blockchain technologies**: The foreseeable impact on society and industry. Computer, v. 50, n. 9, p. 18–28, 2017. ISSN 0018-9162.
- ATZORI, L.; IERA, A.; MORABITO, G. **The internet of things**: A survey. Computer networks, Elsevier, v. 54, n. 15, p. 2787–2805, 2010.
- BACK, A. *et al.* **Hashcash**—a denial of service counter-measure. 2007.
- BELLAVISTA, P. *et al.* **Convergence of manet and wsn in iot urban scenarios**. IEEE Sensors Journal, IEEE, v. 13, n. 10, p. 3558–3567, 2013.
- BELLINI, E. **EDP usa Blockchain para medir o consumo de prosumers no Brasil**. 2018. PV Magazine. Acessado em 30 de março de 2019. Disponível em:

<<https://www.pv-magazine-latam.com/brasil-noticias/edp-usa-blockchain-para-medir-o-consumo-de-prosumers-no-brasil/>>.

BLUMMER, T. *et al.* **An introduction to hyperledger**. <https://www.hyperledger.org>, 2018. Acessado em 21 de dezembro de 2018.

BORGES, P. V. de S. **Análise regulatória e econômica de microrredes elétricas no Brasil**. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2016.

BRASIL. **Lei n. 9.074, de 7 de julho de 1995**. 1995. Acessado em 26 de janeiro de 2019. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/LEIS/L9074cons.htm>.

BRASIL. **Lei n. 9.648, de 27 de maio de 1998**. 1998. Acessado em 26 de janeiro de 2019. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/LEIS/L9648cons.htm>.

BUTERIN, V. Dagger: **A memory-hard to compute, memory-easy to verify script alternative**. [S.l.], 2013.

BUTERIN, V. **On public and private blockchains**. Ethereum blog, v. 7, 2015.

BUTERIN, V.; GRIFFITH, V. **Casper the friendly finality gadget**. arXiv preprint arXiv:1710.09437, 2017.

CARDWELL, D. **Solar experiment lets neighbors trade energy among themselves**. New York Times, v. 13, 2017.

CASTRO, N. J. de. **Visão 2030: Cenários, tendências e novos paradigmas do setor elétrico**. [S.l.]: Babilonia Cultura Editorial, 2015.

CASTRO, N. J. de; BRANDÃO, R. **Questões sobre a renovação das concessões de distribuição**. 2013.

CGSE. **Comitê de revitalização do modelo do setor elétrico**. [S.l.], 2002.

CHIRADEJA, P. **Benefit of distributed generation: A line loss reduction analysis**. In: Proc. IEEE/PES Transmission Distribution Conf. Exposition: Asia and Pacific. [S.l.: s.n.], 2005. p. 1–5. ISSN 2160-8636.

CLOER, J. **Linux foundation's hyperledger project Announces 30 founding members and code proposals to advance blockchain technology**. 2016. Acessado em 21 de dezembro de 2018.

COINMETRICS. **Introducing our adjusted transaction volume estimates**. 2018. Acessado em 28 de dezembro de 2018. Disponível em: <<https://coinmetrics.io/introducing-adjusted-estimates/>>.

COMPOSER, H. **Hyperledger composer**. 2019. Linux Foundation. Acessado em 29 de janeiro de 2019. Disponível em: <<https://hyperledger.github.io/composer/v0.19/introduction/introduction>>.

DAI, W. **B-money**. Consulted, v. 1, p. 2012, 1998.

DEIGN, J. **Wepower expansion hints at adoption of blockchain for energy trading**. 2018. Greentechmedia. Acessado em 25 de janeiro de 2019. Disponível em: <<https://www.greentechmedia.com/articles/read/wepower-expansion-hints-at-blockchain-adoption-in-energy-trading#gs.d6LEP7bN>>.

DONG, Z. *et al.* **Wind power impact on system operations and planning**. In: IEEE. IEEE PES General Meeting. [S.l.], 2010. p. 1–5.

ECONOMICS, O. **The open source era, embrace the future**. 2015. Acessado em 20 de dezembro de 2018.

ENEL. **Projeto microrredes inteligentes**. 2017. Enel. Acessado em 28 de janeiro de 2019. Disponível em: <<https://www.enel.com.br/pt-ceara/Sustentabilidade/iniciativas/archive/projeto-microrredes-inteligentes-traz-inovao-para-o-mercado-de-energia-brasileiro.html>>.

EPE. **Recursos energéticos distribuídos: impactos no planejamento energético**. [S.l.], 2018. Acessado em 01 de abril de 2019. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/sites-pt/sala-de-imprensa/noticias/Documents/ND%20-%20Recursos%20Energ%C3%A9ticos%20Distribu%C3%ADdos.pdf>>.

FEDOTOVA, N.; VELTRI, L. **Byzantine generals problem in the light of P2P computing**. In: Proc. 3rd Annual Int. Conf. Mobile and Ubiquitous Systems - Workshops. [S.l.: s.n.], 2006. p. 1–5.

FELÍCIO, R. A. **“mudanças climáticas” e “aquecimento global” –nova formatação e paradigma para o pensamento contemporâneo?** Ciência e Natura, Universidade Federal de Santa Maria, v. 36, p. 257–266, 2014.

FERREIRA, F. H. *et al.* **A global count of the extreme poor in 2012: data issues, methodology and initial results**. [S.l.]: The World Bank, 2015.

FREIRE, W. **Solução de blockchain dispensa medidor inteligente para GD**. 2018. Canal Energia. Acessado em 30 de março de 2019. Disponível em: <<https://www.canalenergia.com.br/noticias/53070539/solucao-de-blockchain-dispensa-medidor-inteligente-para-gd>>.

GORANOVIC, A. *et al.* **Blockchain applications in microgrids an overview of current projects and concepts**. In: IEEE. IECON 2017-43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. [S.l.], 2017. p. 6153–6158.

GORD, M. **Smart contracts described by Nick Szabo 20 years ago now becoming reality**. 2016. Acessado em 29 de dezembro de 2018. Disponível em: <<https://bitcoinmagazine.com/articles/smart-contracts-described-by-nick-szabo-20-years-ago-now-becoming-reality-1461693751/>>.

HANGXIA, Z. **Mitigating peer-to-peer botnets by sybil attacks**. In: Proc. Int. Conf. Innovative Computing and Communication and 2010 Asia-Pacific Conf. Information Technology and Ocean Engineering. [S.l.: s.n.], 2010. p. 241–243.

HAYEK, F. von; MYRDAL, G. **Economics prize for works in economic theory and inter-disciplinary research**. 1974. The Nobel Prize. Acessado em 30 de dezembro de 2018. Disponível em: <<https://www.nobelprize.org/prizes/economic-sciences/1974/press-release/>>.

HYPERLEDGER. **hyperledger-fabricdocs documentation**. 2019. The Linux Foundation Projects. Acessado em 16 de janeiro de 2019. Disponível em: <<https://media.readthedocs.org/pdf/hyperledger-fabric/latest/hyperledger-fabric.pdf>>.

IEEE Std 1547. **IEEE standard for interconnection and interoperability of distributed energy resources with associated electric power systems interfaces**. IEEE Std 1547-2018 (Revision of IEEE Std 1547-2003), p. 1–138, abr. 2018.

JABRI, Y. A. *et al.* **Voltage stability assessment of a microgrid**. In: Proc. IEEE 8th GCC Conf. Exhibition. [S.l.: s.n.], 2015. p. 1–6.

JOSHI, P.; DHAMAL, S. S. **Interconnection of microgrid with utility grid at distribution level using power electronic converter system**. In: Proc. Communication and Computational Technologies (ICCICCT) 2015 Int. Conf. Control, Instrumentation. [S.l.: s.n.], 2015. p. 735–738.

KANG, E. S. *et al.* **A blockchain-based energy trading platform for smart homes in a microgrid**. In: IEEE. 2018 3rd International Conference on Computer and Communication Systems (ICCCS). [S.l.], 2018. p. 472–476.

KANNAN, K. B.; KUMAR, R. S. **Power flow control and protection in microgrid**. In: Proc. Power and Computing Technologies (ICCPCT) 2013 Int. Conf. Circuits. [S.l.: s.n.], 2013. p. 424–429.

KIM, G.; PARK, J.; RYOU, J. **A study on utilization of blockchain for electricity trading in microgrid**. In: IEEE. 2018 IEEE International Conference on Big Data and Smart Computing (BigComp). [S.l.], 2018. p. 743–746.

KIM, S.-M. **Application and operation of micro grid technology**. Journal of the Electric World/Monthly Magazine, p. 37–44, 2014.

KOIRALA, B. P. *et al.* **Energetic communities for community energy: A review of key issues and trends shaping integrated community energy systems**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Elsevier, v. 56, p. 722–744, 2016.

KOSBA, A. *et al.* Hawk: **The blockchain model of cryptography and privacy-preserving smart contracts**. In: Proc. IEEE Symp. Security and Privacy (SP). [S.l.: s.n.], 2016. p. 839–858. ISSN 2375-1207.

KSHETRI, N.; VOAS, J. **Blockchain-enabled e-voting**. IEEE Software, v. 35, n. 4, p.95–99, jul. 2018. ISSN 0740-7459.

KÜFEOGLU, S. *et al.* **Digitalisation and new business models in energy sector**. Faculty of Economics, University of Cambridge, 2019.

LAI, J. *et al.* **Research on line voltage quality control of microgrid in islanded mode.** In: Proc. IEEE 8th Int. Power Electronics and Motion Control Conf. (IPEMC-ECCE Asia). [S.l.: s.n.], 2016. p. 1754–1758.

LIMA, M. S. de; GREVE, F. G. P. **Detectando falhas bizantinas em sistemas distribuídos dinâmicos.** Revista Brasileira de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos, p. 9–21, 2009.

LINO, G. L. **A fraude do aquecimento global:** como um fenômeno natural foi convertido numa falsa emergência mundial. [S.l.]: Capax Dei, 2009.

LIVINGSTON, D. *et al.* **Applying Block chain Technology to Electric Power Systems.** [S.l.], 2018.

MAMUN, M. **How does Hyperledger Fabric work?** 2018. Medium. Acessado em 01 de julho de 2019. Disponível em: <<https://medium.com/coinmonks/how-does-hyperledger-fabric-works-cdb68e6066f5>>.

MANRÍQUEZ, S. C. P. **Análisis técnico-económico para la implementación de microredes eléctricas en Chile.** Universidad de Chile, 2013.

MASTERS, G. M. **Renewable and efficient electric power systems.** [S.l.]: John Wiley & Sons, 2013.

MCKENNA, E.; THOMSON, M. **High-resolution stochastic integrated thermal – electrical domestic demand model.** Applied Energy, Elsevier, v. 165, p. 445–461, 2016.

MEIPING, X.; YUANWEI, X. **Mean ruin time for gambler’s ruin problem.** In: Proc. Int. Conf. Business Computing and Global Informatization. [S.l.: s.n.], 2011. p. 311–314. ISSN 2378-8941.

MILLER, D.; GRIESING, J. **Engie, Microsoft, SP Group, DBS Bank, TWL, E.ON, and Sonnen Test the First Version of EW Origin Blockchain App.** 2018. Energyweb. Acessado em 25 de janeiro de 2019. Disponível em: <<https://energyweb.org/2018/04/20/engie-microsoft-sp-group-dbs-bank-twl-e-on-and-sonnen-test-the-first-version-of-ew-origin-blockc>>.

MOSKOV, P. **What is bit gold?** The brainchild of blockchain pioneer Nick Szabo. 2018. Coin Central. Disponível em: <<https://coincentral.com/what-is-bit-gold-the-brainchild-of-blockchain-pioneer-nick-szabo/>>.

NAINA, P. M.; RAJAMANI, H.; SWARUP, K. S. **Modeling and simulation of virtual power plant in energy management system applications.** In: Proc. 7th Int. Conf. Power Systems (ICPS). [S.l.: s.n.], 2017. p. 392–397.

NAKAMOTO, S. **Bitcoin:** a peer-to-peer electronic cash system. Working Paper, 2008.

NAVIGANT RESEARCH. **Microgrid Deployment Tracker 4Q16.** 2016. Disponível em: <<https://www.navigantresearch.com/research/Microgrid-deployment-tracker-4q16>>.

NORDHAUS, W. D. **Schumpeterian profits in the American economy: Theory and measurement.** [S.l.], 2004.

OFFICE OF ELECTRICITY DELIVERY & ENERGY RELIABILITY. "**GRID 2030**": A National Vision for Electricity's Second 100 Years. 2003. United States Department of Energy, Office of Electric Transmission and Distribution. Disponível em: <https://www.energy.gov/sites/prod/files/oeprod/DocumentsandMedia/Electric_Vision_Document.pdf>.

OLIVEIRA, G. A. d. *et al.* **Microrredes em mercados de energia elétrica.** 2017.

PAGLIARDI, O.; SOBREIRO DIAS, J. C. **Evolução do setor elétrico:** uma breve reflexão. *Interciência & Sociedade*, v. 1, n. 1, 2011.

PAPATHANASSIOU, S. *et al.* **A benchmark low voltage microgrid network.** In: Proceedings of the CIGRE symposium: power systems with dispersed generation. [S.l.: s.n.], 2005. p. 1–8.

PLAZA, C. *et al.* **Distributed solar self-consumption and blockchain solar energy exchanges on the public grid within an energy community.** In: IEEE. 2018 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2018 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC/I&CPS Europe). [S.l.], 2018. p. 1–4.

PRODIST. **Módulo 1**–introdução. Agência Nacional de Energia Elétrica–ANEEL., 2018. RESEARCH, N. Microgrid deployment tracker RQ15. 2015.

RIBEIRO, L. H. M. **Risco de mercado na comercialização de energia elétrica:** uma análise estruturada com foco no ambiente de contratação livre-ACL. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2017.

ROCHA, L. **Bit gold:** Nick Szabo esteve a poucos passos de inventar o Bitcoin. 2018. Acessado em 30 de dezembro de 2018. Disponível em: <<https://www.criptomoedasfacil.com/bit-gold-nick-szabo-esteve-a-poucos-passos-de-inventar-o-bitcoin/>>.

RUUBEL, M. **Us department of energy contracts guardtime, siemens and industry partners for blockchain cybersecurity solution.** *Guardtime*, September, v. 21, 2017.

SAJANA, P.; SINDHU, M.; SETHUMADHAVAN, M. **On blockchain applications: hyperledger fabric and ethereum.** <https://acadpubl.eu/jsi/2018-118-18/articles/18c/84.pdf>: *International Journal of Pure and Applied Mathematics*, 2018. v. 118. (2965-2970, 18).

SALMAN, T. *et al.* **Security services using blockchains:** A state of the art survey. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, p. 1, 2018. ISSN 1553-877X.

SAUAIA, R. L. **Energia solar fotovoltaica:** panorama, oportunidades e desafios. 2018. ABSOLAR. Acessado em 08 de fevereiro de 2019. Disponível em:

<<http://ons.org.br/AcervoDigitalDocumentosEPublicacoes/02-Setor-Dr.RodrigoLopesSauaia-Absolar.pdf>>.

SCARAMUCCI, H. F. A.; ARONNE, R. **Perspectivas de alteração do mercado livre de energia**. 2019. Conjur. Acessado em 30 de março de 2019. Disponível em: <<https://www.conjur.com.br/2019-jan-15/opiniaoperspectivasalteracao-mercado-livre-energia>>.

SCHWAB, K. **A Quarta Revolução Industrial**. Edipro. São Paulo. 2016.

SEKULOVSKIBOJAN. **Nick Szabo was on the verge of developing bit-coin: bit gold, inflation, bitcoin - part 2**. 2018. Newconomy. Acessado em 09 de janeiro de 2019. Disponível em: <<https://newconomy.media/article/nick-szabo-was-on-the-verge-of-developing-bitcoin-bit-gold-inflation-bitcoin-part-2/>>.

SYLLA, R.; KAUFMAN, H. **The us banking system: origin, development, and regulation**. Institute of American History. Disponível em: <<http://ap.gilderlehrman.org/history-by-era/economics/essays/us-banking-system-origin-development-and-regulation?period=7>>.

SZABO, N. **Smart contracts: building blocks for digital markets**. Extropy, 1996. Disponível em: <http://www.fon.hum.uva.nl/rob/Courses/InformationInSpeech/CDROM/Literature/LOTwinterschool2006/szabo.best.vwh.net/smart_contracts_2.html>.

SZABO, N. **Shelling out: the origins of money**. 2002. Acessado em 30 de dezembro de 2018. Disponível em: <<https://nakamoinstitute.org/shelling-out/>>.

TECHRACERS, W. **Hyperledger v/s ethereum**. 2017. Techracers Enterprise. Acessado em 16 de janeiro de 2019. Disponível em: <<https://www.techracers.com/blogs/hyperledger-vs-ethereum/>>.

TENFEN, D.; FINARDI, E. C. **A mixed integer linear programming model for the energy management problem of microgrids**. Electric Power Systems Research, Elsevier, v. 122, p. 19–28, 2015.

TON, D. T.; SMITH, M. A. **The us department of energy's microgrid initiative**. The Electricity Journal, Elsevier, v. 25, n. 8, p. 84–94, 2012.

TRUSTNODES. **Ofgem starts blockchain sandbox with EDF energy and other**. 2017. Acessado em 25 de janeiro de 2019. Disponível em: <<https://www.trustnodes.com/2017/07/07/ofgem-starts-blockchain-sandbox-edf-energy-others>>.

WALKER, L. **This new carbon currency could make us more climate friendly**. In: World Economic Forum, September. [S.l.: s.n.], 2017. v. 19.

WANG, Z. *et al.* **Research on the active power coordination control system for wind/photovoltaic/energy storage**. In: IEEE. 2017 IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2). [S.l.], 2017. p. 1–5.

WEAVER, J. F. **New milestone: 95renewables on sunday at 11 am.** 2016. Electrek. Acessado em 08 de fevereiro de 2019. Disponível em: <<https://electrek.co/2016/05/09/new-milestone-95-of-german-electricity-provided-by-renewables-on-sunday-at-11-am/>>.

WORLD ENERGY COUNCIL. **World energy trilemma - 2017.** 2017. World Energy Council. Acessado em 01 de fevereiro de 2019. Disponível em: <https://www.worldenergy.org/wp-content/uploads/2017/11/World-Energy-Trilemma-2017_Full-report_WEB.pdf>.

WU, X. *et al.* **Research on microgrid and its application in china.** Energy and Power Engineering, Scientific Research Publishing, v. 5, n. 04, p. 171, 2013.

YU, J. *et al.* **Review of microgrid development in the united states and china and lessons learned for china.** Energy Procedia, Elsevier, v. 145, p. 217–222, 2018.

ZENG, Z. *et al.* **Policies and demonstrations of micro-grids in china: A review.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, Elsevier, v. 29, p. 701–718, 2014.

ZHANG, F.; ZHAO, H.; HONG, M. **Operation of networked microgrids in a distribution system.** CSEE Journal of Power and Energy Systems, v. 1, n. 4, p. 12–21, dez. 2015. ISSN 2096-0042.

ZHANG, H.; ZHOU, D.; CAO, J. **A quantitative assessment of energy strategy evolution in china and us.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, Elsevier, v. 15, n. 1, p. 886–890, 2011.

ZHANG, Y.; WEN, J. **An iot electric business model based on the protocol of bitcoin.** In: Proc. 18th Int. Conf. Intelligence in Next Generation Networks. [S.l.: s.n.], 2015. p. 184–191.

ZHENG, Z. *et al.* **An overview of blockchain technology: Architecture, consensus, and future trends.** In: Proc. IEEE Int. Congress Big Data (BigData Congress). [S.l.: s.n.], 2017. p. 557–564.

ZHENG, Z. *et al.* **Blockchain challenges and opportunities: A survey.** Work Pap, 2016.

ZIBELMEN, A. **Reving up the energy vision in new york: Seizing the opportunity to create a cleaner, more resilient, and affordable energy system.** IEEE Power and Energy Magazine, IEEE, v. 14, n. 3, p. 18–24, 2016.

ZUBAIRY, R. **Create a decentralized energy network with hyperledger composer.** 2017. IBM. Acessado em 10 de janeiro de 2019. Disponível em: <<https://developer.ibm.com/patterns/decentralized-energy-hyperledger-composer/>>.

ZUBAIRY, R. **Decentralized energy composer.** 2017. IBM. Acessado em 10 de janeiro de 2019. Disponível em: <<https://github.com/IBM/Decentralized-Energy-Composer/wiki>>.

LONG, C. *et al.* **Peer-to-peer energy trading in a community microgrid.** In: Proc. IEEE Power Energy Society General Meeting. [S.l.: s.n.], 2017. p. 1–5. ISSN 1944-9933.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTAR

ALKETBI, A.; NASIR, Q.; TALIB, M. A. **Blockchain for government services** — use cases, security benefits and challenges. In: Proc. 15th Learning and Technology Conf. (L T). [S.l.: s.n.], 2018. p. 112–119.

HAYEK, Friedrich A. **Individualism and economic order**. No. 330.15/h41i. 1946.

SILVESTRE, M. L. D. *et al.* **A technical approach to the energy blockchain in microgrids**. IEEE. Transactions on Industrial Informatics. V. 14, n. 11, p. 4792–4803, 2018.

VON MISES, Ludwig. **Ação Humana**. São Paulo: Instituto Ludwig von Mises Brasil, 2010.