

APLICAÇÃO DA TECNOLOGIA BLOCKCHAIN NOS SISTEMAS ELÉTRICOS DE ENERGIA

LUÍS MIGUEL CUNHA CARDOSO

Outubro de 2018

APLICAÇÃO DA TECNOLOGIA BLOCKCHAIN NOS SISTEMAS ELÉTRICOS DE ENERGIA



Departamento de Engenharia Eletrotécnica

Mestrado em Engenharia Eletrotécnica – Sistemas Elétricos de Energia

2018

Relatório elaborado para satisfação parcial dos requisitos da Unidade Curricular de DSEE -
Dissertação do Mestrado em Engenharia Eletrotécnica – Sistemas Elétricos de Energia

Candidato: Luís Miguel Cunha Cardoso, Nº 1120547, 1120547@isep.ipp.pt

Orientação científica: Filipe Miguel Tavares Azevedo, fta@isep.ipp.pt



Departamento de Engenharia Eletrotécnica

Mestrado em Engenharia Eletrotécnica – Sistemas Elétricos de Energia

2018

Agradecimentos

A elaboração da Dissertação de Mestrado, no âmbito de Engenharia Eletrotécnica – Sistemas Elétricos de Energia, apenas foi possível graças ao apoio de inúmeras Pessoas que estiveram ao meu lado ao longo deste percurso académico, às quais deixo algumas palavras de agradecimento.

Gostaria de agradecer ao meu orientador, Engenheiro Filipe Azevedo, pelo seu entusiasmo aquando da primeira vez que discutimos o tema, e pelo seu contínuo acompanhamento e supervisão do trabalho, durante os meses passados na sua elaboração. Durante as nossas reuniões, o Engenheiro continuou a desafiar-me para tirar o máximo proveito do meu trabalho, fazendo com que o stress se fosse apaziguando. Tenho de admitir que foi bastante difícil, e frustrante por vezes, mas, no final, estou bastante orgulhoso do resultado.

Quero agradecer a todos os meus colegas e amigos do ISEP que me ajudaram a escolher este tema e que me motivaram a começar a aprender mais sobre *blockchain*. Obrigado pelas discussões que tivemos, que fizeram com que hoje esteja aqui a escrever a minha dissertação, num tema bastante controverso e ainda inexplorado por muitos.

Por último, mas não menos importante, gostaria de agradecer à minha família e amigos por me apoiarem nesta jornada. Especialmente, um grande obrigado ao meu pai e mãe, Hermínio Cardoso e Isabel Cunha, respetivamente. Obrigado pelas distrações quando eu precisei delas, pelo apoio infinito e pela crença em mim.

Luís Cardoso

Porto, setembro 2018

**“A nova geração sempre nos levará a novas inovações e
maneiras de fazer as coisas que nunca poderíamos imaginar
antes”**

Dhanin Chearavonont

Presidente Sênior do grupo Charoen Pokphand

Resumo

O sistema energético foi originalmente desenvolvido com base na produção de energia centralizada, transporte, distribuição e consumo, cujos interesses dos consumidores são representados pelos fornecedores de energia e pelos operadores de sistemas de distribuição. No entanto, o paradigma está em constante mudança. A participação das energias renováveis está a crescer e os consumidores estão cada vez mais envolvidos na produção de energia. Como resultado, a parcela das fontes de energia intermitente aumenta, assim como a necessidade de flexibilidade da rede.

Devido à flexibilidade necessária para o fornecimento de energia, as tecnologias digitais para a comunicação entre dispositivos, produtores e consumidores de energia elétrica, terão de ser desenvolvidas. Isso ajudará a equilibrar a produção e o consumo, sem custos elevados e sem complicações para os consumidores. A *blockchain* é uma das tecnologias que potencialmente poderá servir de solução para a operação dos mercados de energia.

A *blockchain* permite transações diretas e confiáveis de ativos, sem a necessidade de um intermediário ou instituição central no controlo. A aplicação desta tecnologia nos sistemas elétricos de energia (SEE) poderá levar à desintermediação do mesmo. Atualmente, o sistema do mercado de energia integra diversos intermediários. A utilização da tecnologia *blockchain* poderá levar à remoção, mudança ou criação de novos intermediários, de novos relacionamentos e de novas interdependências.

Os contadores inteligentes e os contratos inteligentes poderão ter impactos significativos no mercado de energia. Os contadores inteligentes já começam a ser comuns ao público, permitindo a automatização do registo do fluxo de energia num determinado ponto da rede. Os contratos inteligentes permitem que cláusulas previamente estabelecidas sejam automaticamente cumpridas, e a *blockchain* permite que isso seja feito *peer-to-peer* (P2P). Assim, sem uma autoridade central, o uso de contratos e contadores inteligentes juntamente com a *blockchain* garantem a automação das transações com um nível de segurança elevado.

No sector da energia ainda não são claros os benefícios da implementação desta tecnologia, mas podemos prever que o impacto a nível da redução de custos pode ser bastante significativo. O mercado de medição também poderá vir a ser profundamente afetado, uma vez que deixarão de ser necessários intermediários para agregar e transmitir os dados sobre geração e consumo. Claramente, toda a eletricidade pode ser liquidada de forma muito precisa a preços variáveis em curtos períodos. A *blockchain* pode então abrir caminho para um sistema de energia completamente descentralizado e automatizado. As funções do fornecedor de energia, do operador de mercado, do fornecedor independente de serviços e da mobilidade elétrica, bem como dos agregadores de dados poderão ser diretamente substituídas por uma aplicação baseada na tecnologia *blockchain*. Com a aplicação desta nos SEE a diversidade de papéis diminui, bem como o número de entidades necessárias no processo de compra e venda de energia.

Há um longo caminho a percorrer antes que a tecnologia *blockchain* possa ser usada da maneira apresentada, existem ainda muitas incertezas, problemas e dificuldades que precisam de ser resolvidos. No entanto, quando nos concentramos nas possibilidades que esta tecnologia poderá teoricamente fornecer, podemos concluir que esta tem o potencial tecnológico de, pelo menos, transformar o ecossistema energético, de ser um futuro concorrente de organizações e mercados energéticos, bem como, o potencial de mudar a totalidade do ecossistema de negócios da indústria da energia. Como resultado, o futuro de múltiplas funções no ecossistema de energia atual torna-se questionável.

A *blockchain*, para além de ser usada para executar transações de fornecimento de energia, poderia também servir de base para processos de medição, cobrança e verificação. Outras possíveis áreas de aplicação são na documentação de propriedade, na gestão de ativos, garantias de origem, emissão de subsídios e energia renovável certificada. A tecnologia *blockchain* tem o potencial para mudar radicalmente a energia como a vemos, começando por sectores individuais e transformando finalmente o mercado de energia.

Palavras-Chave: Blockchain, Sistemas Elétricos de Energia, Internet-of-Things, Micro-redes, Negociação de Energia Peer-to-Peer, Mercado de Eletricidade

Abstract

The energy system was originally developed based on the production of centralized energy, transportation, distribution and consumption, whose interests of the consumers are represented by energy suppliers and distribution system operators. However, the paradigm is constantly changing. The share of renewable energy is growing, and consumers are increasingly involved in energy production. As a result, the share of intermittent power supply increases, as does the need for network flexibility.

Due to the flexibility required for energy supply, digital technologies for communication between devices, producers and consumers of electricity will have to be developed. This will help to balance production and consumption, without high costs and without complications for consumers. Blockchain is one of the technologies that can potentially serve as a solution to the operation of energy markets.

A blockchain allows direct and reliable asset transactions without the need for an intermediary or central institution in control. The application of this technology in electrical energy systems (SEE) may lead to disintermediation of the same. Currently, the energy market system integrates several intermediaries. The use of blockchain technology may lead to the removal, change or creation of new intermediaries, new relationships and new interdependencies.

Smart energy counters and smart contracts can have significant impacts on the energy market. Intelligent energy counters are already becoming common to the public, allowing the automation of the recording of the flow of energy at certain points in the network. Smart contracts allow previously established clauses to be automatically met, and blockchain allows this to be done via peer-to-peer (P2P). Thus, without a central authority, the use of smart contracts and energy counters along with the blockchain ensure the automation of transactions with a high level of security.

The benefits of implementing this technology are still unclear in the energy sector, but we can predict that the impact on cost reduction can be quite significant. The measurement market may also be profoundly affected as intermediaries will no longer be

required to collect and transmit data on generation and consumption. Clearly, all electricity can be measured very precisely at variable prices over short periods. The blockchain can then pave the way for a completely decentralized and automated energy system. The functions of the power supplier, market operator, independent service provider and electric mobility, as well as data aggregators can be directly replaced by an application based on blockchain technology. With the application of this in the SEE the diversity of roles decreases, as well as the number of entities required.

There is a long way to go before the blockchain technology can be used in the way presented in this study, there are still many uncertainties, problems and difficulties that need to be solved. However, when we focus on the possibilities that this technology can theoretically provide, we can conclude that it has the technological potential to at least disturb the energy ecosystem, to be a future competitor of energy organizations and markets, as well as the potential of change the whole energy business ecosystem. As a result, the future of multiple functions in the current energy ecosystem becomes questionable.

A blockchain, in addition to being used to perform power supply transactions, could also serve as a basis for measurement, collection, and inspection processes. Other possible areas of application are in property documentation, asset management, guarantees of origin, issuance of subsidies and certified renewable energy. Blockchain technology has the potential to radically change energy as we see it.

Keywords:

Blockchain, Electric Energy Systems, Internet-of-Things, Microgrids, Peer-to-Peer Energy Trading, Electricity Market

Índice

| | | |
|----------|--------------------------------------------------------------|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 1 |
| 1.1 | CONTEXTUALIZAÇÃO | 1 |
| 1.2 | OBJETIVOS | 3 |
| 1.3 | CALENDARIZAÇÃO | 3 |
| 1.4 | ORGANIZAÇÃO DO RELATÓRIO | 4 |
| 2 | PERSPETIVAS DE EVOLUÇÃO DOS SEE | 5 |
| 2.1 | TRANSFORMAÇÕES IMPULSIONADAS PELA QUALIDADE DO AR E DO CLIMA | 5 |
| 2.2 | DESCENTRALIZAÇÃO | 6 |
| 2.2.1 | <i>Produção distribuída</i> | 7 |
| 2.2.2 | <i>Armazenamento</i> | 9 |
| 2.2.3 | <i>Eficiência energética</i> | 10 |
| 2.2.4 | <i>Flexibilidade</i> | 11 |
| 2.3 | ELETRIFICAÇÃO | 12 |
| 2.4 | DIGITALIZAÇÃO | 14 |
| 2.4.1 | <i>Contadores inteligentes e sensores inteligentes</i> | 14 |
| 2.4.2 | <i>Internet-of-Things</i> | 15 |
| 2.4.3 | <i>Plataformas digitais de serviços energéticos</i> | 16 |
| 2.5 | SEGURANÇA CIBERNÉTICA | 17 |
| 2.6 | MERCADO ENERGÉTICO | 18 |
| 2.6.1 | <i>A liberalização do mercado</i> | 18 |
| 2.6.2 | <i>Mercados P2P e blockchain</i> | 18 |
| 3 | BLOCKCHAIN | 21 |
| 3.1 | PROTOCOLO DA CONFIANÇA | 21 |
| 3.2 | BITCOIN | 23 |
| 3.3 | CRÍPTOMOEDAS, <i>ALTCOINS</i> E <i>TOKENS</i> | 26 |
| 3.4 | TRANSAÇÕES | 27 |
| 3.4.1 | <i>Funcionamento</i> | 28 |
| 3.5 | BLOCKCHAIN PÚBLICA, PRIVADA E HÍBRIDA | 30 |
| 3.6 | MODELOS DE CONSENSO | 31 |
| 3.6.1 | <i>Problemas dos generais bizantinos</i> | 31 |
| 3.6.2 | <i>Proof-of-Work</i> | 33 |
| 3.6.3 | <i>Discussão do modelo Proof-of-Work</i> | 34 |
| 3.6.4 | <i>Proof-of-Stake</i> | 37 |
| 3.6.5 | <i>Protocolo Ripple</i> | 38 |
| 3.7 | TIPOS DE APLICAÇÃO | 39 |

| | | |
|----------|-------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 3.8 | CONTRATOS INTELIGENTES..... | 41 |
| 3.8.1 | <i>Funcionamento.....</i> | 41 |
| 3.9 | APLICAÇÕES DESCENTRALIZADAS, DAPP | 42 |
| 4 | APLICAÇÃO DA <i>BLOCKCHAIN</i> AOS SEE | 45 |
| 4.1 | DESENVOLVIMENTOS E TENDÊNCIAS ATUAIS | 45 |
| 4.1.1 | <i>Pagamentos com criptomoedas.....</i> | 45 |
| 4.1.2 | <i>Negociações P2P</i> | 46 |
| 4.1.3 | <i>Distribuição otimizada de energia solar e eólica</i> | 47 |
| 4.1.4 | <i>Cobrança e compartilhamento de infraestruturas e VE.....</i> | 47 |
| 4.1.5 | <i>Energia renováveis.....</i> | 48 |
| 4.1.6 | <i>Eficiência Energética</i> | 48 |
| 4.1.7 | <i>Mercado grossista de eletricidade</i> | 49 |
| 4.1.8 | <i>Pesquisa</i> | 50 |
| 4.1.9 | <i>Outras Startups</i> | 51 |
| 4.2 | IMPLICAÇÕES NOS CONSUMIDORES E <i>UTILITIES</i> | 51 |
| 5 | ESTUDO DE CASOS..... | 53 |
| 5.1 | MICRO-REDE COMUNITÁRIA - CENÁRIO A..... | 55 |
| 5.1.1 | <i>Descrição cenário A.....</i> | 55 |
| 5.1.2 | <i>Simulação do cenário A</i> | 58 |
| 5.1.3 | <i>Resultados do cenário A.....</i> | 58 |
| 5.2 | MICRO-REDE COM MERCADO INTERNO - CENÁRIO B | 60 |
| 5.2.1 | <i>Descrição do cenário B.....</i> | 60 |
| 5.2.2 | <i>Simulação do cenário B</i> | 62 |
| 5.2.3 | <i>Resultados do cenário B.....</i> | 65 |
| 5.3 | MICRO-REDE COM MERCADO INTERNO E TRANSAÇÕES P2P - CENÁRIO C..... | 66 |
| 5.3.1 | <i>Descrição do cenário C.....</i> | 66 |
| 5.3.2 | <i>Simulação do cenário C</i> | 68 |
| 5.3.3 | <i>Resultados do cenário C</i> | 71 |
| 5.4 | MICRO-REDE COM MERCADO INTERNO, TRANSAÇÕES P2P E RECURSOS DE ARMAZENAMENTO – CENÁRIO D | 78 |
| 5.4.1 | <i>Descrição do cenário D</i> | 78 |
| 5.4.2 | <i>Simulação do cenário D.....</i> | 80 |
| 5.4.3 | <i>Resultados do cenário D</i> | 81 |
| 5.5 | ANÁLISE DOS RESULTADOS E TRABALHO FUTURO | 83 |
| 6 | CONCLUSÕES..... | 87 |
| 7 | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 91 |
| | ANEXOS..... | 99 |

Índice de Figuras

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 Funções adicionais e tecnologias incorporadas no futuro sistema elétrico de energia [1] | 2 |
| Figura 2 Tecnologias habilitadoras da descentralização da energia [1] | 7 |
| Figura 3 Mix de geração de energia [6] | 8 |
| Figura 4 Previsão do preço da bateria de íões de lítio até 2030 [8] | 9 |
| Figura 5 Previsão da frota global de VE até 2030 [9] | 13 |
| Figura 6 <i>Internet-of-Things</i> nos SEE [12] | 16 |
| Figura 7 Sequência de processos numa transação na <i>blockchain</i> [25] | 28 |
| Figura 8 Validação de um bloco [25] | 29 |
| Figura 9 Problema dos generais Bizantinos | 31 |
| Figura 10 Taxa de <i>hash</i> da rede Bitcoin [28] | 35 |
| Figura 11 Percentagem da taxa de <i>hash</i> total das piscinas de mineração [29] | 36 |
| Figura 12 Exemplo de um contrato inteligente [30] | 42 |
| Figura 13 Exemplo de esquema de uma comunidade que utiliza a <i>blockchain</i> para liquidar pagamentos [71] | 52 |
| Figura 14 Estrutura de mercado elétrico do cenário A | 55 |
| Figura 15 Interações - cenário A | 57 |
| Figura 16 Estrutura de mercado elétrico do cenário B C e D | 60 |
| Figura 17 Interações - cenário B | 62 |

| | | |
|------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 18 | Busca pelo endereço do contrato criado | 69 |
| Figura 19 | Primeiras transações | 70 |
| Figura 20 | Wallet do prosumer 1 | 70 |
| Figura 21 | Exemplo de transação manual entre <i>prosumer 1</i> e <i>prosumer 2</i> | 73 |
| Figura 22 | Especificações da transação a submeter na rede <i>blockchain</i> Ethereum | 74 |
| Figura 23 | Transações associadas ao endereço de <i>wallet</i> do <i>prosumer 1</i> | 75 |
| Figura 24 | Interface da <i>wallet</i> do <i>prosumer 1</i>, no final do dia | 76 |
| Figura 25 | Interações - cenário D | 79 |
| Figura 26 | Transação de 1Ether para o contrato | 80 |
| Figura 27 | Busca pelo endereço do contrato criado após a transação | 80 |
| Figura 28 | Wallet da comunidade | 81 |
| Figura 29 | Dados do consumo e produção de cada <i>prosumer</i> | 105 |
| Figura 30 | Dados dos pagamentos ao minuto ao longo de 24 horas (cenário A) | 107 |
| Figura 31 | Dados dos pagamentos ao minuto ao longo de 24 horas (cenário B) | 107 |
| Figura 32 | Dados dos pagamentos ao minuto ao longo de 24 horas (cenário D) | 108 |
| Figura 33 | Dados dos pagamentos ao minuto ao longo de 24 horas (cenário C) | 108 |
| Figura 34 | Dados dos pagamentos, em EnergyTokens, ao minuto ao longo de 24 horas (cenário D) | 109 |
| Figura 35 | Dados dos pagamentos, em EnergyTokens, ao minuto ao longo de 24 horas (cenário C) | 109 |
| Figura 36 | Gráficos da bateria | 117 |

Índice de Tabelas

| | | |
|------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabela 1 | Participantes de mercado cenário A | 56 |
| Tabela 2 | Preços praticados no cenário A | 58 |
| Tabela 3 | Fatura diária de cada <i>prosumer</i> | 59 |
| Tabela 4 | Participante cenário B | 61 |
| Tabela 5 | Preços praticados no Cenário B | 63 |
| Figura 6 | Exemplo no cenário B | 64 |
| Tabela 7 | Participante adicionais cenário C | 66 |
| Tabela 8 | Endereços de cada <i>prosumer</i> | 67 |
| Tabela 9 | Preços praticados no Cenário B | 71 |
| Tabela 10 | Fatura diária de cada <i>prosumer</i> para com o fornecedor de energia (cenário C) | 72 |
| Tabela 11 | Montantes totais de ET gastos (positivo) ou ganhos (negativos) em 24 horas | 72 |
| Tabela 12 | Balanço de cada Wallet no início e final do dia. | 76 |
| Tabela 13 | Participantes adicionais do cenário D | 78 |
| Tabela 14 | Fatura diária de cada <i>prosumer</i> para com o fornecedor de energia (cenário D) | 81 |
| Tabela 15 | Montantes totais de ET gastos (positivos) ou ganhos (negativos) em 24 horas | 82 |
| Tabela 16 | Cronograma do plano de investigação da dissertação | 101 |

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabela 17 Exemplos gerais de casos de uso para contratos inteligentes e DApps [32] | 103 |
| Tabela 18 Fatura de cada <i>prosumer</i> em euros (cenário B) | 111 |
| Tabela 19 Montantes a pagar em EnergyTokens entre <i>prosumers</i> (cenário A) | 113 |
| Tabela 20 Montantes a pagar em EnergyTokens entre <i>prosumers</i> (cenário D) | 115 |

Acrónimos

SEE – Sistemas Elétricos de Energia

PoW – *Prove of Work*

PoS – *Prove of Stack*

P2P – *Peer-to-Peer*

ICO – *Initial Coin Offer*

VE – Veículos Elétricos

ICO – *Initial Coin Offer*

TI – Tecnologia da Informação

IoT – *Internet-of-Things*

DLT – *Distributed Ledger Technology*

GEE – Gases com Efeito de Estufa

NEO – New Energy Outlook 2018

1 Introdução

1.1 Contextualização

A tecnologia e a inovação têm alterado os modelos tradicionais de geração de eletricidade, e o sistema elétrico está no meio de uma transformação. Há três tendências, em particular, que estão a transformar o sistema atual. A **eletrificação** de grandes sectores económicos, como os transportes e o aquecimento, a **descentralização** provocada pela diminuição acentuada dos custos dos recursos energéticos distribuídos, como o armazenamento distribuído, a geração distribuída, a flexibilidade da oferta e procura de energia e a eficiência energética, e finalmente, a **digitalização** da rede com a implementação dos contadores inteligentes, dos sensores inteligentes, de uma maior automação do sistema e, o surgimento da *Internet-of-Things* (IoT) [1].

Juntas, estas tendências da rede abrem caminho rumo a um sistema em que as fronteiras tradicionais entre produtores, distribuidores e clientes são indefinidas, aumentando a complexidade da gestão do sistema. O papel da rede está a mudar. Além do fornecimento de eletricidade, a rede está a evoluir para uma plataforma que também maximiza o valor das fontes de energia distribuída. Os clientes individuais vão poder escolher as tecnologias do seu agrado, conectá-las à rede e, eventualmente, com outros recursos distribuídos e centralizados.

Este sistema de energia mais inteligente, mais descentralizado e mais conectado poderá aumentar a confiabilidade, a segurança, a sustentabilidade ambiental, a utilização de ativos e abrir novas oportunidades para serviços e negócios.

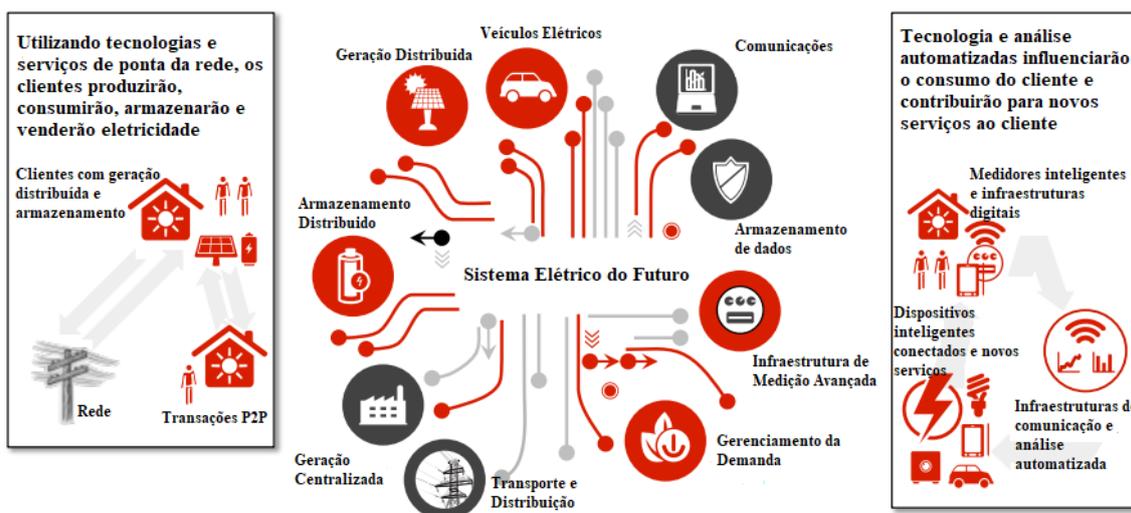


Figura 1 Funções adicionais e tecnologias incorporadas no futuro sistema elétrico de energia [1]

A eletricidade em si é negociada em diferentes mercados de energia. O mercado grossista, o mercado diário, o mercado a prazo, o mercado de serviços de sistema e o mercado retalhista. Porque a energia vendida não pode (ainda) ser armazenada em larga escala, a eletricidade tem de ser produzida ao mesmo tempo que é consumida. De maneira a ter a certeza que a procura de eletricidade pode ser fornecida e distribuída, os diferentes mercados foram estabelecidos. O sistema atual assume um consumidor passivo, em que os seus interesses têm de ser representados pelo fornecedor de energia e pelos operadores do sistema de distribuição.

A tecnologia *blockchain*, é hoje uma tecnologia com elevado potencial de ascensão. A *blockchain* é uma *ledger*¹ incorruptível de transações de dados que mantém registos em ordem cronológica, baseada na tecnologia de contabilidade distribuída (*Distributed Ledger Technology-DLT*), descentraliza o armazenamento de dados numa rede de computadores [2].

¹ Banco de dados onde o controle sobre a evolução dos dados é compartilhado entre entidades (computadores).

A tecnologia *blockchain* permite executar transações diretas e confiáveis de ativos entre qualquer parte disposta a fazê-lo, sem a necessidade de um intermediário, ou uma parte central no controlo do processo. Os dados inseridos são vinculados a blocos de dados anteriores e futuros, significando que, uma vez que os dados forem inseridos e validados, eles não podem mais ser alterados. Isto é de grande utilidade quando aplicado a finanças, mas a *blockchain* pode ser implantada para toda uma gama de usos, especialmente quando há várias partes contratantes a participar num determinado processo. Assim sendo, a tecnologia *blockchain* pode potencialmente servir para alguns dos problemas do sistema de energia atual e conduzir a novos papéis, relações e interdependências que vão fundamentalmente diferir do sistema atual.

1.2 Objetivos

O objetivo deste estudo é explorar se há formas diferentes de organizar o ecossistema de energia recorrendo à *blockchain* como tecnologia habilitadora. Como esta é ainda uma tecnologia imatura, apenas foram desenvolvidas algumas possíveis aplicações no sector da energia. Como resultado, o possível impacto que terá na configuração do ecossistema é ainda desconhecido. E como ainda há muitas incertezas quanto ao potencial da tecnologia *blockchain*, um estudo nesta área de pesquisa será de carácter exploratório. Previamente, analisaremos o estado global dos atuais SEE, e tentaremos prever os desenvolvimentos mais óbvios, assim como as novas tendências. A ideia visa explorar um novo paradigma na operação da rede elétrica sem as restrições regulatórias do sistema de energia atual.

Esta dissertação destina-se a qualquer pessoa disposta a explorar a tecnologia *blockchain*, em particular o uso da *blockchain* na indústria da energia. Devido a que tanto a *blockchain* como a indústria da energia são tópicos bastante complexos, um dos objetivos desta pesquisa é ser capaz de discutir os dois tópicos numa linguagem compreensível.

1.3 Calendarização

Esta dissertação teve início a 28 de fevereiro de 2018, o seu término será a 7 de outubro do mesmo ano. A partir desse dia será preparada a sua defesa.

A primeira fase caracterizou-se pelo estudo do estado da arte da tecnologia *blockchain* nos SEE. Na segunda fase estudou-se a forma de implementar a tecnologia. Na terceira fase

implementou-se a simulação projetada, onde se trataram os dados e de onde se retiraram as respectivas conclusões. A última centrou-se no registo escrito que deu origem à conceção final desta dissertação. O cronograma do plano da investigação da dissertação está descrito na Tabela 17 do anexo A.

1.4 Organização do relatório

A dissertação encontra-se organizada em seis capítulos. A introdução, três capítulos teóricos, o capítulo da aplicação prática, e o último capítulo referente à conclusão e desenvolvimentos futuros.

O primeiro capítulo que compõem a primeira parte da dissertação tem carácter introdutório. Apresenta os principais aspetos que motivaram o trabalho, a caracterização dos objetivos e a calendarização do mesmo.

O segundo capítulo pretende perspetivar a evolução dos sistemas elétricos de energia (SEE). Procura investigar tendências atuais das redes de energia do presente, e, com base em relatórios internacionais, tentar perceber como os SEE vão evoluir nas próximas décadas.

O terceiro capítulo efetua uma introdução teórica à tecnologia *blockchain* onde são apresentadas as bases teóricas desta tecnologia.

No quarto capítulo efetua-se o levantamento do estado da arte no que diz respeito ao desenvolvimento de aplicações da tecnologia *blockchain* nos SEE, sendo um ponto de partida para perceber como a tecnologia pode ser aplicada no sector da energia.

O quinto capítulo apresenta a estratégia de implementação da simulação de transações *peer-to-peer* (P2P) criada numa micro-rede com doze habitações.

Esta dissertação finaliza com a apresentação das considerações finais, que sintetizam as conclusões da investigação, e da simulação criada a partir das limitações encontradas e do conhecimento obtido.

2 Perspetivas de evolução dos SEE

Os sistemas elétricos de energia estão a ser alvo de um profundo choque disruptivo [3], que deve-se em grande medida à inovação tecnológica, às políticas ambientais e às reformas regulamentares rigorosas, da atualidade.

Neste capítulo procuramos analisar este conjunto de transformações e tendências globais, apesar de ser pouco claro como tais desenvolvimentos vão afetar o sistema elétrico como um todo, no futuro. Através de dados energéticos do presente e previsões da configuração dos SEE no futuro, pretende-se ter uma noção das principais implicações numa futura configuração dos sistemas e mercados de energia.

2.1 Transformações impulsionadas pela qualidade do ar e do clima

O clima e a qualidade do ar são responsáveis por algumas das mudanças mais profundas que ocorreram durante esta fase inicial pós-industrial, que fundamentalmente consistiu em leis e políticas relacionadas com mudanças climáticas.

A produção de energia é responsável por 60% das emissões globais de gases com efeito de estufa (GEE) devido à utilização massiva de combustíveis fósseis. Devido a este facto, se nada for mudado, o aumento global de temperatura pode exceder em 4°C os níveis pré-industriais [4].

O número de leis e políticas adotadas relacionadas com as mudanças climáticas foi grande, na última década, estando-se atualmente a atravessar a fase da implementação e consolidação dessas políticas. Por exemplo, na União Europeia, 60% das centrais elétricas não cumprem com a diretiva 210/75/EU, relativa às emissões industriais. E como consequência serão fechadas ou recondicionadas.[5]

O Acordo de Paris, que é um compromisso considerado histórico, assinado em dezembro de 2015, cimentou a ambição global da mitigação climática. Foi negociado por 195 países com o principal objetivo de conter o aquecimento global do planeta, ao reduzir as emissões de GEE. Os países que integraram este acordo acordaram medidas para que o aumento da temperatura média global do planeta fosse limitado a 1.5°C acima dos níveis

pré-industriais. O acordo reconheceu que os planos individuais de cada nação, acerca da mitigação climática, eram insuficientes para atingir as metas acordadas e que ações adicionais seriam necessárias. Todos os países deverão atingir o pico das suas emissões o mais cedo possível para que, idealmente algures na segunda metade deste século, os GEE e os combustíveis fósseis tenham sido abandonados quase por completo [6].

Graças a estes desenvolvimentos, surgiram inúmeras iniciativas com vista a gerar energia limpa. Verificou-se um forte investimento em energia renovável por parte dos governos, e, em particular, um grande incentivo à produção descentralizada para autoconsumo.

2.2 Descentralização

A descentralização da rede refere-se ao aparecimento de novas tecnologias que, fundamentalmente, têm diferentes implicações na rede. Primeiro, a geração distribuída a partir de fontes renováveis, principalmente solar fotovoltaica, que reduz a procura por eletricidade durante as horas ensolaradas do dia. Em segundo, o armazenamento distribuído que armazena energia localmente para o uso durante os períodos de pico ou como reserva, achatando os picos e os vales da procura. Em terceiro, a eficiência energética permite reduzir o consumo de certos aparelhos e serviços, providenciando o mesmo desempenho e reduzindo a procura no geral. E finalmente, a resposta à procura que permite o controlo da energia durante o período de pico, onde os preços são mais altos, reduzindo o consumo durante esse período.



Figura 2 Tecnologias habilitadoras da descentralização da energia [1]

2.2.1 Produção distribuída

As tecnologias principais que visam reduzir as emissões de GEE são a energia nuclear, a captura e armazenamento de dióxido de carbono e as renováveis [5].

Os sistemas de captura e armazenamento de dióxido de carbono, têm tido uma falta de implementação, devido ao facto de ser uma tecnologia recente, existem em número reduzido. O custo de construções das centrais nucleares, bem como as preocupações públicas e políticas sobre a segurança nuclear, tornaram a energia solar e eólica as mais significantes contribuintes para esta nova capacidade de geração “verde” [5].

Segundo um relatório recente *New Energy Outlook* (NEO), é expectável que em 2050 a energia solar e eólica abasteçam 50% da população, e, em conjunto com a hidroelétrica, a nuclear e outras, as energias com zero emissões de carbono irão representar 71% da energia total. Atualmente 67% da produção de eletricidade total resulta da queima de combustíveis fósseis, sendo assim, expectável que este valor desça para apenas 29%. No que toca à Europa, 87% do fornecimento será renovável até 2050. Esta mudança está a ser impulsionada pela energia solar fotovoltaica e eólica baratas [7].

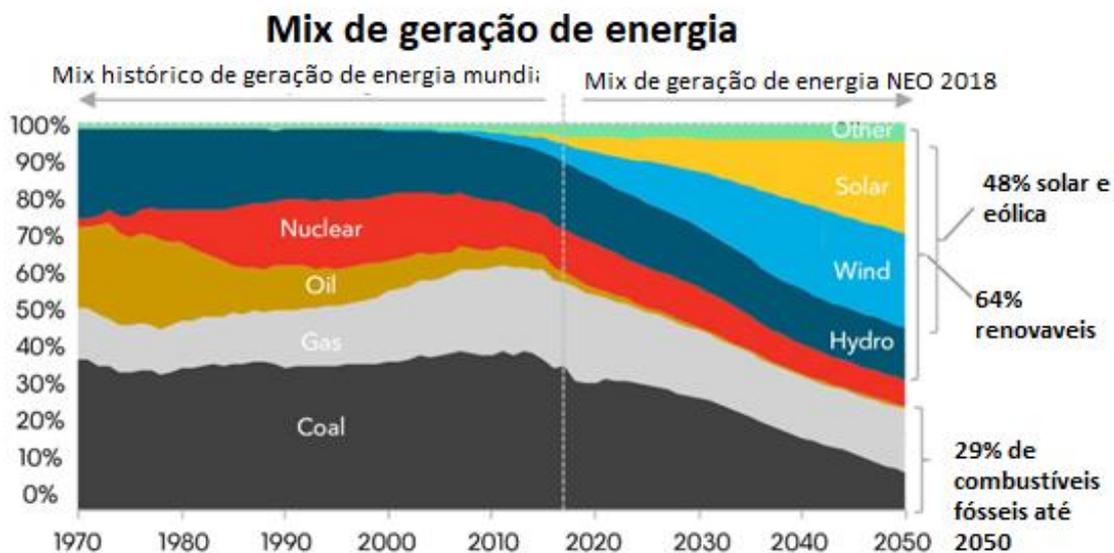


Figura 3 Mix de geração de energia [6]

Desde os anos 70, os combustíveis fósseis têm comandado uma parte consistente, ou seja, cerca de 60 a 70% do mix global de geração de energia. Contudo esta tendência tem vindo a inverter-se, tendendo a acabar, com o surgimento das energias renováveis baratas, que estão reestruturando os sistemas de energia por todo o mundo.

De acordo com o NEO, perto de onze triliões de dólares, até 2050, vão ser investidos globalmente na geração de energia, dos quais oito triliões vão para geração de energia solar e eólica e apenas um trilião e meio para outras tecnologias de zero emissões, como a hidroelétrica e a nuclear. A implantação em grande escala de energia eólica e solar fotovoltaica, na última década, foi dominada pela Europa. No entanto, nos últimos cinco anos o principal investimento foi na Ásia, liderado pela China. A implantação em grande

escala de energias renováveis, particularmente a energia solar fotovoltaica e a energia eólica, já mudou o mix de eletricidade na Europa e em outras partes do mundo [7].

Espera-se que até 2050, a configuração de muitos sistemas seja caracterizada pela forte aposta na energia solar que suprime o consumo diurno. Mas, como as energias renováveis são variáveis, em termos de disponibilidade e quantidade de energia produzida, a variabilidade do lado da oferta, aumenta também, pelo que será necessário responder à procura de energia com capacidade flexível. Isto é, ter meios de armazenar energia renovável quando a procura é baixa e a oferta alta, para o uso posterior, quando a procura for maior, normalmente nos períodos de pico.

2.2.2 Armazenamento

Segunda o NEO, está previsto que sejam investidos 548 biliões de dólares em armazenamento, recorrendo a baterias de iões de lítio, dois terços desse montante ao nível da rede e um terço por detrás do contador, ou seja pelos proprietários de casas e empresas. São esperados declínios dramáticos no custo das baterias que acabarão por se traduzir em aplicações de armazenamento mais baratas. A redução deste custo significa que a geração eólica e solar serão, cada vez mais, capazes de funcionar *quando o vento não está a soprar e o sol não está a brilhar* [7].

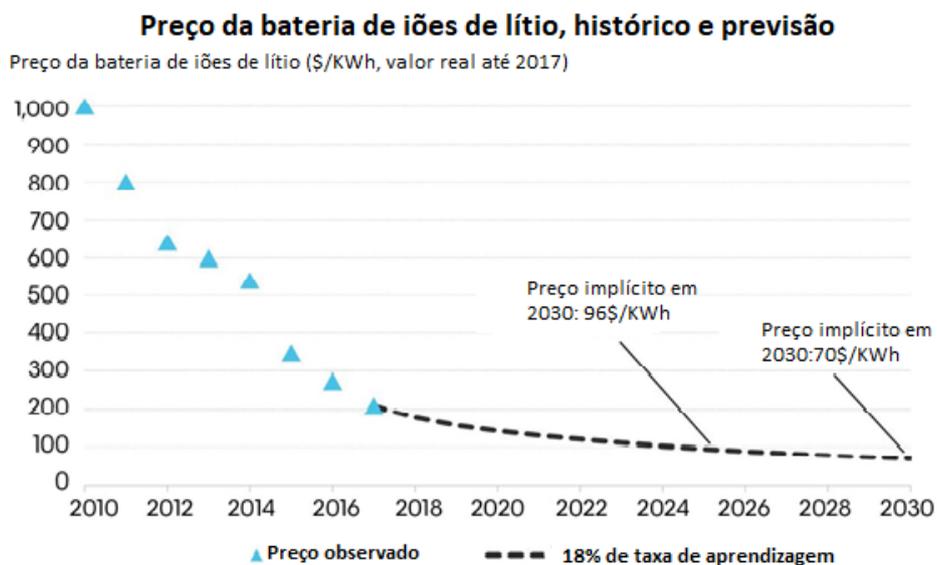


Figura 4 Previsão do preço da bateria de iões de lítio até 2030 [8]

As baterias oferecem flexibilidade à rede, ou seja, possuem capacidade de ligar e desligar em resposta a défices de eletricidade e excedentes, ao longo de períodos de horas. A flexibilidade oferecida pelo armazenamento, a preço acessível, faz com que se prefira esta tecnologia como tecnologia de equilíbrio, ao invés de centrais termoelétricas, para suprir picos de consumo. Quando a procura é baixa as baterias podem recarregar-se com os excedentes da produção distribuída.

Por enquanto, o armazenamento de eletricidade ainda é dominado pelo armazenamento hidroelétrico. Devido à sua versatilidade e baixo custo, as baterias são, cada vez mais, consideradas como uma parte fundamental da infraestrutura da rede do futuro.

2.2.3 Eficiência energética

Outra das características da descentralização dos SEE é a eficiência energética. Na última década houve uma forte aposta na eficiência energética, onde se desenvolveram diretivas que obrigam à certificação energética. A eficiência energética é geralmente considerada como o meio mais económico e prudente para reduzir as emissões de GEE. A iluminação e os edifícios foram os principais sectores visados para melhorar a eficiência energética. Contudo, ainda estão para ser implementadas medidas significativas nos edifícios, transportes e indústria. Os sistemas com motores devem, também, tornar-se cada vez mais eficientes.

A intensidade energética de uma economia, definida como a razão entre o consumo interno de energia de um país e o seu Produto Interno Bruto (PIB), diminuiu para quem implantou medidas de eficiência energética, acelerando o crescimento de serviços ao mesmo tempo que o desenvolvimento da infraestrutura foi desacelerando. As melhorias da intensidade energética, juntamente com a implantação de renováveis, resultaram num crescimento lento da procura por eletricidade. Esta tendência, afetou as *utilities*² tradicionais de eletricidade, refletido na diminuição dos preços das ações [5].

² Empresas de serviços públicos como, por exemplo, uma companhia de eletricidade.

2.2.4 Flexibilidade

Os desenvolvimentos tecnológicos permitiram aumentar as formas sustentáveis de gerar energia e reduzir rapidamente os preços dessa tecnologia. Contudo, o aumento da quantidade de fontes renováveis anda de mãos dadas com o aumento de fontes de energia intermitente, como a energia solar e eólica. Como resultado, o desafio de balancear a oferta e procura aumentou.

Atualmente verifica-se um aumento de iniciativas no sentido de gerar energia local e regionalmente, o que resulta num aumento gradual do fornecimento de energia descentralizada. O sistema de energia de hoje foi originalmente desenvolvido com base na produção de energia centralizada, consequentemente, a flexibilidade no sistema industrial de energia que é preciso para estas tendências ainda não foi incorporado no sistema. Assim sendo, podemos concluir que o sistema de energia corrente não está adaptado aos desenvolvimentos atuais.

À medida que a penetração das energias renováveis aumenta, e a produção em escala se reforma, a flexibilidade da oferta torna-se uma prioridade maior. Atualmente, a flexibilidade é fornecida por uma combinação de centrais dedicadas a suprir picos de energia, para atender às mudanças da procura. Será necessária uma maior capacidade e flexibilidade, face aos limites para o que as energias renováveis e as baterias podem fazer em conjunto. Contudo, com o aumento de baterias descentralizadas, as *utilities* tradicionais provavelmente experimentarão uma maior concorrência nos serviços de balanceamento, uma vez que as baterias também podem oferecer flexibilidade, proporcionando equilíbrio na rede.

De modo a permitir flexibilidade da oferta e do fornecimento de energia, as tecnologias digitais para a comunicação entre computadores, dispositivos e fornecedores, ou consumidores de energia terão de ser integradas no sistema, a fim de que seja possível assegurar o balanceamento da produção e do consumo, em cada intervalo de tempo, de modo a evitar custos altos e incómodos desnecessários aos consumidores.

Os sistemas elétricos de energia terão de ser confiáveis, acessíveis e sustentáveis. Para um sistema confiável é indispensável que o balanço entre a produção e o fornecimento estejam balanceados em todos os momentos, e a capacidade de transportar energia através

do sistema seja suficiente. Para se equilibrar a oferta e procura de energia, foi desenvolvido um sistema com diferentes mercados e os operadores do sistema de distribuição, assim como os operadores do sistema de transporte, os quais têm sido os responsáveis pela estabilidade da infraestrutura do sistema.

O sistema da indústria energética está a mudar rapidamente devido ao surgimento de novas tecnologias para produzir e armazenar energia. Os comportamentos dos consumidores também têm mudado: de usuários passivos têm se tornado cada vez mais ativos, e até *prosumers*³.

2.3 Eletrificação

À medida que a geração é mais renovável, a eletrificação cria mais benefícios ambientais, ao transferir muitos dos usos finais de eletricidade das fontes de combustível fosseis para fontes renováveis. As maiores oportunidades na eletrificação estão entre os maiores poluidores, nomeadamente, o transporte, a indústria e o aquecimento [1].

No sector dos transportes os veículos elétricos (VE) são a tecnologia que mais evoluiu nos últimos anos e a mais promissora no que toca à eletrificação. A autonomia dos VE melhorou de menos de 160Km para mais de 500 Km para alguns modelos. O custo das baterias desceu drasticamente, tendo como resultado, o decréscimo do preço dos VE, permitindo o lançamento no mercado de VE *low-cost*, como o Nissan Leaf ou o Tesla Model 3.

Na opinião do NEO, os VE vão crescer de 1.8% das vendas de veículos de passageiros para 55% das novas vendas até 2040. Isso vai aumentar globalmente em 2000TWh a procura por eletricidade, quando os VE representarem 9% da procura total de eletricidade global. Em alguns países, como a Alemanha, esta proporção é ainda maior, com os VE a representarem 24% da procura total de eletricidade até 2050 [7].

³ Consumidores de eletricidade que também produzem eletricidade para autoconsumo ou para fornecimento de volta à rede.

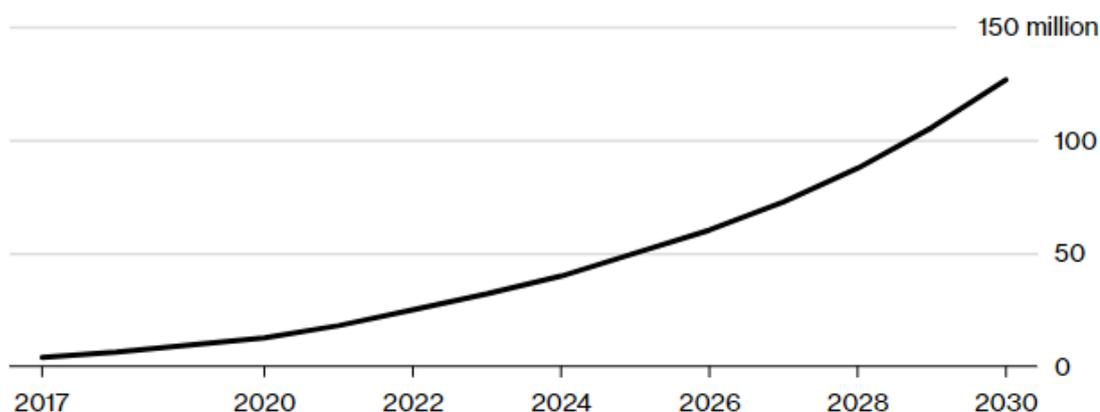


Figura 5 Previsão da frota global de VE até 2030 [9]

Nos próximos anos, haverá milhões de VE que possuem fontes de armazenamento de energia. Para o uso ideal da energia armazenada nesses veículos, podem ser utilizados métodos inteligentes. Esses veículos, quando estacionados, podem inserir energia na rede, conhecida como veículo-a-rede (V2G), ou absorver energia da rede para carregar as baterias de armazenamento, conhecidas como rede-veículo [10].

A implementação de preços flexíveis, através da tecnologia de carregamento e de sinais de preço, deve permitir o carregamento flexível e inteligente, caso contrário se todos os VE forem carregados durante as horas de pico, a procura de pico aumentará o que levará a um maior investimento em geração de energia de pico. Uma solução seria a maioria dos proprietários de VE carregarem os seus veículos durante as horas de sol, motivados pelo preço reduzido da energia a estas horas, uma vez que as renováveis estão a funcionar.

A adoção destes veículos aumentará o consumo de energia, o que permitirá a otimização da rede, através da tecnologia de recarregamento, em conjunto com preços adequados e com carregamentos inteligentes e flexíveis. Adicionalmente, a tecnologia V2G pode facilitar a injeção de energia na rede, proporcionando aos proprietários um ganho adicional.

Estima-se que em 2050 cerca de 50% da frota de VE possa ser conectada à rede, a qualquer momento, quando não estiver em trânsito, cobrando da rede por meio de uma tarifa

de uso, sempre que houver energia renovável barata. Isso significa que, até 2050, espera-se que cerca de 4% do horário da procura por eletricidade se altere. Uma boa parte dela vai processar-se ao meio dia, coincidindo com o máximo solar e apoiando a construção de geração fotovoltaica [7].

A longo prazo, com o crescimento da energia solar fotovoltaica, a procura flexível vai efetuar-se cerca do meio-dia em muitos mercados. Caso haja disponibilidade da infraestrutura de cobrança, tanto pública como no local no trabalho, os proprietários podem adquirir energia de baixo custo. Se o carregamento for inteligente e a infraestrutura suficiente, para que a procura se espalhe pela noite, quando os motoristas estão em casa e durante o dia, quando as pessoas estão no trabalho, os picos da procura vão ser pequenos.

Nos edifícios e indústria, a iluminação, a refrigeração, os aparelhos e a maquinaria são quase totalmente alimentados por eletricidade. Como vimos, a eficiência energética tem compensado o crescimento da procura de serviços energéticos. E, por exemplo, ao contrário dos VE, é muito mais improvável gerir a procura de eletricidade para aquecimento eletrificado, consequentemente o aumento da flexibilidade do sistema é mais difícil.

2.4 Digitalização

A tecnologia digital permite haver dispositivos a comunicar através da rede e a providenciar dados úteis para os clientes, que facilitam a gestão e operação da rede. Os contadores inteligentes, os sensores inteligentes, o controlo remoto e automação da rede, proporcionado pela *Internet-of-Thing* (IoT), e as plataformas digitais focadas na otimização e agregação, permitem em tempo real operar a rede e os seus recursos, recolhendo dados para melhorar os serviços. O melhoramento de serviços através do melhor acesso a informação e dados permite operações autónomas que vão ajudar na flexibilidade dos clientes na gestão da sua própria procura, otimizando os seus custos [1].

2.4.1 Contadores inteligentes e sensores inteligentes

Os contadores inteligentes e sensores inteligentes estão a ser implantados em larga escala no sistema. A Comissão Europeia estima que 72% das residências terão contadores de eletricidade inteligente instalados até 2020 [11].

Estes atuam como um controlador que monitoriza consistentemente o consumo de energia de dispositivos conectados à rede. As tecnologias de comunicação viáveis usadas na infraestrutura de medição avançada para gestão remota de aparelhos, consistem na comunicação entre linhas de energia via *wireless*. Os consumidores têm o benefício de gerir os seus aparelhos nos seus *smartphones*, onde eles podem atualizar o preço da energia e, de boa vontade, mudam as suas cargas das horas mais caras para as horas com preços mais baixos. Gestão online e facturamento é a outra vantagem importante destes contadores [10].

A infraestrutura digital proporcionada por estes sensores permite gerir a oferta, o consumo e o desempenho da rede. Pode ser utilizada para recolher e partilhar dados, permitindo modificar a oferta, a procura e operar ativos da rede, em tempo real. O resultado são custos mais precisos, muitas vezes menores para os consumidores finais e serviços.

2.4.2 *Internet-of-Things*

A Internet-of-Things vai mudar o mundo da energia tal como o conhecemos, e com isso mudarão também, os modelos de negócio de empresas de energia. Segundo Thomas Zimmermann, CEO da unidade Digital Grid Business, na Siemens, milhões de dispositivos vão estar em breve conectados à IoT, oferecendo uma mina de ouro de dados, mas até agora menos de 0.5% dos dados estão a ser usados. O sistema de energia está em evolução para um sistema mais descentralizado e mais descarbonizado, e a digitalização é a chave para criar valor acrescentado [12].

Juntamente com a produção distribuída, as baterias, contadores inteligentes, e V2G, um grande número de consumidores poderão tornar-se *prosumers*, vendendo energia e serviços de flexibilidade de volta à rede de forma inteligente. Mas esses potenciais *prosumers* estão atualmente fora do mercado. Ter milhões de famílias a comunicar simultaneamente com o sistema, com o objetivo de ter uma demanda flexível, é tecnicamente desafiador devido ao volume de dados que exige de processamento em tempo real [5].

Controlar os ativos da rede de maneira mais funcional e inteligente é o que mais ajudará à flexibilidade do sistema elétrico. Algoritmos terão de agregar dados e controlar os ativos, e a inteligência artificial poderá também ter um papel importante, uma vez que tem o potencial de otimizar as regras que governam o balanceamento e gestão do sistema. Os milhões de dispositivos que vão estar ligados à IoT vão implicar um volume de

processamento de dados enorme, tornando a gestão de todos estes dispositivos bastante difícil. Serão necessários agregadores de dados para permitir o controle inteligente destes dispositivos ligados à IoT e aos contadores inteligentes. Este ponto é crítico para o sucesso da flexibilidade da rede.

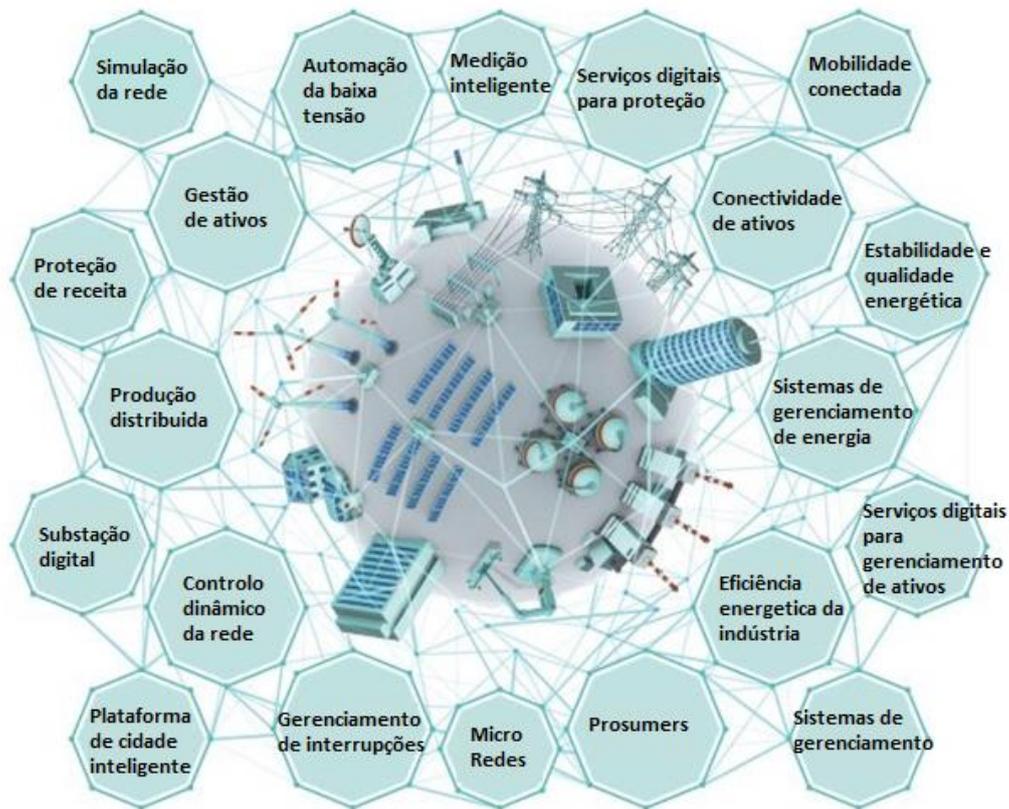


Figura 6 *Internet-of-Things* nos SEE [12]

2.4.3 Plataformas digitais de serviços energéticos

A digitalização poderá resultar em modelos de negócio baseados na administração de plataformas de serviços energéticos, para o uso dos consumidores que possuem produção distribuída. Estes podem, não apenas comprar eletricidade à rede, mas vendê-la de volta ao mercado. Governos e reguladores terão de definir as regras e protocolos destas plataformas

de serviços energéticos. Se implementado, permitirá a conexão da produção distribuída à rede e permitirá a emergência de novos serviços orientados para o consumidor [5].

As *utilities* tradicionais já enfrentam um grande número de potenciais concorrentes, como a Google e a Amazon. Estes dois gigantes estão a negociar com os reguladores a introdução de tarifas variáveis com o tempo de uso para permitir um mercado mais flexível [13].

2.5 Segurança Cibernética

O sector de energia é a infraestrutura crítica de uma nação e outros sectores dependem direta e indiretamente deste sector. Devido à digitalização da rede este tema é cada vez mais importante. A segurança cibernética é a proteção dos ativos (tanto de hardware quanto de software) de desastres naturais ou provocados pelo homem, tanto atividades intencionais quanto não intencionais. A segurança cibernética é o aspeto mais importante das redes inteligentes para assegurar o fornecimento contínuo de energia sem qualquer intervenção externa. Ela garantirá robustez, confiabilidade e monitorização da rede [10].

As interrupções do fornecimento de energia causadas pelos ataques cibernéticos e as ameaças físicas à rede de distribuição são uma das maiores preocupações dos governos [14]. As redes estão cada vez mais expostas devido ao aumento significativo de dispositivos domésticos ligados à IoT. A questão de quem possui os dados e tem acesso aos mesmos também será cada vez mais importante. Conseguir um grau de proteção adequado é um desafio, devido à complexidade das redes de distribuição e ao crescente financiamento e sofisticação dos atacantes. As empresas de energia estão insuficientemente protegidas e preparadas, como demonstrado em 2015, quando a rede elétrica ucraniana foi atacada, causando a perda de energia de mais de duzentos mil consumidores [15].

2.6 Mercado Energético

2.6.1 A liberalização do mercado

Pelo meio da liberalização dos mercados, em muitos países, empresas tradicionais de eletricidade foram desagregadas, e a operação da rede elétrica separada das operações de retalho. Este processo permitiu que novas empresas entrassem no mercado. Apesar desta mudança, a maioria dos sistemas de energia continuou a ser operada por empresas com grandes centrais de energia, vendendo para os consumidores que continuam a ter as mesmas relações passivas com os seus fornecedores de eletricidade. A tendência na última década foi a liberalização e privatização, levando à diminuição do envolvimento do Estado no sector da energia. Eles confiaram no mercado para cumprir os objetivos das políticas nacionais relativas ao fornecimento de energia, no entanto, uma proporção significativa da geração de energia global permanece sendo propriedade pública [5].

As privatizações das empresas tradicionais trouxeram uma reestruturação no sector, com monopólios forçados a separar as suas atividades comerciais. No entanto, o processo continua semelhante, uma vez que as novas empresas geralmente são subsidiárias das empresas de energia estabelecidas. Apesar disso, associado à liberalização está um esperado aumento da concorrência que pode ter reflexo nos preços e na qualidade do serviço, levando a uma melhor satisfação dos clientes finais, mas para já, só no futuro é que podemos verificar completamente isso. O modelo convencional de geração transformou-se num modelo de negócio de gestão de fluxo de eletricidade. As empresas de energia devem tirar proveito da nova estrutura através da junção com a tecnologia, sob pena de poderem ficar para trás.

2.6.2 Mercados P2P e *blockchain*

O número crescente de produção distribuída e agregadores de dados está a proporcionar oportunidades para novos métodos de pagamento. Estes métodos podem prejudicar ainda mais as *utilities* tradicionais, pela entrada de mais concorrentes no mercado. Uma dessas tendências, potencialmente disruptiva, é o surgimento de transações *peer-to-peer* (P2P), facilitada pela tecnologia *blockchain*.

Num princípio de mercado P2P, todos podem negociar com todos, o negócio pode estabelecer-se entre *prosumer* e consumidor, *prosumer e prosumer*, retalhista e consumidor,

veículo e veículo, operador sistema de transmissão e serviços de negociação, etc. O principal objetivo é permitir um mercado equilibrado entre partes em vez de um controlador central.

Blockchains, contratos inteligentes e a *Internet-of-Things* poderão ser usados para permitir transações P2P entre todos os intervenientes do mercado. Consequentemente, todos os intervenientes têm liberdade de escolha para fazer as suas próprias negociações, ou automaticamente pela cooperação da IoT e contratos inteligentes. Um *prosumer* que vende uma pequena quantidade de energia e ganha alguns euros por dia não vai querer fazer negociações a cada 15 minutos. Em vez disso tudo pode ser totalmente automatizado e feito sem o envolvimento do proprietário, enquanto os maiores produtores ainda têm a opção de fazer as suas próprias negociações.

Similarmente ao mercado grossista, nos mercados P2P todos os contratos devem ter informação específica quanto ao montante de energia, preço, localização e período. Como outros mercados de eletricidade, o mercado P2P depende fortemente da previsão para ajudar a garantir a estabilidade operacional do sistema de energia, o que requer um equilíbrio constante entre procura e oferta. Não se sabe quantas vezes a energia é comprada e vendida até atingir o consumidor, contudo, sabemos que todo o processo reduz a eficiência e aumenta os preços. No mercado P2P, por outro lado, a eletricidade pode ser comprada diretamente ao produtor, aumentando a eficiência e diminuindo o custo.

Outra diferença significativa que o mercado P2P traz é o facto de os consumidores de energia não terem de ter um contrato permanente com o distribuidor para pagar serviços de distribuição. Cada transação feita no mercado P2P deve reservar automaticamente uma percentagem do dinheiro para o distribuidor, pelos seus serviços (se a estrutura da rede for de propriedade do distribuidor). Contratos inteligentes fornecem a garantia que o distribuidor recebe uma certa quantia por cada KWh transacionado. Normalmente, os preços dos fornecedores de eletricidade não diferem de acordo com a localização dos utilizadores assegurando justiça. No entanto, em taxas de transação de mercado P2P, os preços devem ser ajustados de acordo com a distância entre comprador e vendedor. Se tanto o comprador como o vendedor estiverem na mesma micro-rede devem pagar uma quantia menor e se eles estão em micro-redes diferentes eles devem pagar uma quantia maior para a distribuição. Ter preços mais altos para a entrega de energia para distâncias maiores pode ser uma solução

para os possíveis congestionamentos da rede e problemas de eficiência derivado das perdas no transporte.

Estão a ser desenvolvidas propostas nas quais os serviços agregadores de dados se juntam com as transações P2P, de modo a garantir que as famílias pagam uma taxa pelo uso da rede [16]. Se a *blockchain* se tornar perturbadora, os reguladores precisarão de se adaptar para permitir que os *prosumers* vendam energia diretamente através da rede. Atualmente, os regulamentos proíbem isso [5].

3 Blockchain

Todos os dias novos artigos, estudos, blogs, conferências, e protótipos de *blockchain* aparecem. Claramente há muita atenção virada para a *blockchain*, mas apenas algumas pessoas compreendem perfeitamente a tecnologia. Este capítulo visa principalmente dissipar os mal-entendidos e inconsistências do conceito de *blockchain*. Apesar da tecnologia que nós agora chamamos *blockchain* já ter sido introduzida em 2008 por Satoshi Nakamoto, ainda não existe uma definição clara do termo *blockchain*.

Este capítulo apresenta a base teórica necessária para perceber o funcionamento da tecnologia *blockchain* e como a *blockchain* pode ser uma parte importante dos SEE. Falaremos da tecnologia *blockchain* e das suas diferentes gerações. Serão explicados os algoritmos de consenso mais conhecidos, nomeadamente, o *Proof-of-Work* (PoW), o *Proof-of-Stake* (PoS) e o protocolo Ripple. Estes algoritmos são parte essencial na segurança da *blockchain* e têm um grande impacto na eficiência e custo da mesma.

3.1 O protocolo da confiança

As primeiras quatro décadas da internet trouxeram-nos e-mail, a World Wide Web, os media sociais, web móvel, computação em nuvem, e os primeiros dias da *Internet-of-Things*. Foi ótimo para reduzir custos de procura de informação, de colaboração, e na troca de informação. Reduziu as barreiras à entrada de novos meios de comunicação e entretenimento, novas formas de retalho e trabalho de organizações, e empreendimentos digitais sem precedentes. No geral, a internet permitiu muitas mudanças positivas, para aqueles que têm acesso a ela, mas tem limitações graves para negócios e atividades económicas. Online, nós ainda não conseguimos confiar uns nos outros, de maneira a transacionar e trocar dinheiro sem a validação de uma terceira parte. Estes mesmo intermediários, coletam os nossos dados e invadem a nossa privacidade, para obter ganhos comerciais e para a segurança nacional [17].

A tecnologia não cria prosperidade, ela destrói a privacidade. Contudo, nesta era digital, a tecnologia está no centro de quase tudo, tanto do bom como do mau. Ela permite ao humano valorizar e violar os direitos uns dos outros de novas formas. A explosão da

comunicação online e do comércio, está a criar oportunidades para o crime cibernético. A lei de Moore diz que a duplicação do poder de processamento, duplica o poder dos burlões, ladrões de dados, *spammers*, ladrões de identidade, espiões, hackers, *cyber bullying* e *datanappers*⁴ [18].

Pagar com cartões de crédito pela internet é inseguro, os usuários têm de divulgar demasiada informação pessoal, e as taxas cobradas em pagamentos pequenos são demasiado altas. De maneira a resolver estes problemas, em 2008, Satoshi Nakamoto esboçou um novo protocolo para um sistema de dinheiro eletrónico *peer-to-peer*, usando uma criptomoeda chamada Bitcoin. As criptomoedas são diferentes das tradicionais moedas fiduciárias, porque não são criadas ou controladas por países. Este protocolo estabelece um conjunto de regras, na forma de computações distribuídas, que asseguram a integridade dos dados trocados no meio de milhões de dispositivos, sem a necessidade de intermediação de uma terceira parte de confiança.

Em todo o mundo, as pessoas perceberam as implicações de um protocolo que permite, a meros mortais, fabricar confiança através de código inteligente. Isto nunca tinha acontecido. Transações diretas de confiança entre duas ou mais partes, verificadas e autenticadas pela colaboração massiva motivada pelo interesse próprio e coletivo, em vez de corporações motivadas pelo lucro. A *blockchain* permite-nos trocar dinheiro diretamente e com segurança sem termos de passar por um banco, companhia de cartões de crédito ou pelo Paypal [17].

Devido à sua natureza descentralizada e ao seu modelo de incentivos, a *blockchain* representa uma grande ameaça ao estado atual da internet. Isto é, qualquer coisa que já foi feita ou armazenada em bases de dados centrais, pode agora ser realizada e registada na *blockchain*, criando uma trilha infinita e imutável de registos de propriedade, contratos programáveis, informações financeiras, dados pessoais e muito mais. Esta base de dados seria propriedade dos seus usuários, algo inédito hoje em dia. Empresas como a Google,

⁴ Um tipo de software malicioso projetado para bloquear o acesso a um sistema informático até que seja paga uma quantia.

Youtube, Amazon e Facebook devem estar preocupados uma vez que, em teoria, a *blockchain* tem o potencial de tirar o poder deles e devolver o controlo aos usuários. Os usuários podem ver e verificar o que está a acontecer com os seus dados, onde estão a ser armazenados, quem os está a ler e para quem são transferidos. Em caso de partilha, estes podem ainda ser remunerados automaticamente, ganhando valor com os seus próprios dados, o que atualmente é totalmente embolsado por empresas privadas que detêm o monopólio.

Em vez da internet da informação, a *blockchain* é a internet do valor ou do dinheiro [19]. É também uma plataforma para toda a gente saber o que é verdade, pelo menos no que diz respeito à estrutura de registos de informação. No seu básico, é um código-aberto, toda a gente pode fazer o *download* de graça, e correr. Tem o potencial, no mínimo, para o desenvolvimento de novas aplicações e tem a capacidade de transformar muitas coisas.

Bancos e alguns governos estão a implementar a *blockchain* como um registo distribuído para revolucionar a forma como a informação é guardada e transmitida. Os objetivos são claros, velocidade, custos baixos, segurança, menos erros, e a eliminação de pontos centrais de ataque e falha. Estes modelos nem sempre envolvem criptomoedas para pagamentos [20].

3.2 Bitcoin

A tecnologia *blockchain* está intimamente ligada à moeda digital Bitcoin que foi inventada em 2008 com a publicação de um artigo na internet: '*Bitcoin: A peer-to-peer Electronic Cash System*' por um autor desconhecido sob o pseudónimo Satoshi Nakamoto [21]. Neste artigo, Nakamoto combina vários componentes criptográficos para esboçar um sistema de pagamento P2P, hoje conhecido como uma criptomoeda, que permite a transferência de ativos digitais sem a necessidade de um intermediário de confiança. É a amalgamação destas componentes criptográficas que desde então se tornou conhecida como a tecnologia *blockchain*.

A Bitcoin não é gravada num ficheiro em qualquer sítio, é representada por transações registadas numa *blockchain*, um tipo de planilha global, livro-razão ou banco de dados, ao qual damos o nome de *ledger*. Cada *blockchain*, como a que usa a Bitcoin, é **distribuída**, ela corre nos computadores providenciados por voluntários pelo mundo fora.

A *blockchain* é **pública**, qualquer pessoa pode vê-la a qualquer instante, porque ela permanece na rede, sem nenhuma instituição delegada para auditar e manter o registo das transações. A *blockchain* é **encriptada**, é usada encriptação na forma de chaves públicas e privadas de maneira a providenciar segurança virtual [22].

A vasta rede de computadores, em todo o mundo, que correm a *ledger* da Bitcoin, em todos os segundos, de todos os dias, estão a manter a *ledger* atualizada e completamente em consenso. Isto é feito através de um sistema que incentiva o próprio processo e a confirmação de transações.

Quando uma transação ocorre, primeiramente, aparece na rede num conjunto de transações não confirmadas, como milhares de outras feitas pelo mundo fora. Milhões de computadores, que fazem parte da rede, coletam algumas dessas transações e colocam-nas nos seus próprios blocos, os computadores estão constantemente a criar novos blocos, na esperança que o seu bloco passe a ser o próximo a ser adicionado à *blockchain*. Quando um computador cria um bloco que é reconhecido como o próximo da *blockchain*, é recompensado com um prémio, Bitcoins criadas recentemente.

A maneira de um computador ganhar o prémio é tentando adivinhar a resposta de um problema matemático extremamente complicado. Este problema é tão complicado que mesmo com milhões de computadores, a tentarem adivinhar a resposta, a um ritmo de mil milhões de tentativas por segundo ou mais, ainda assim, leva aproximadamente dez minutos a descobrir a resposta. Ao fazê-lo, os computadores usam uma imensidade de energia, custando uma fortuna correr estes problemas matemáticos. Então, porque os computadores (os usuários) o fazem? Porque poderá ser bastante rentável. E é daqui, que o termo *mining* surge. Em vez de amearhar ouro pela mineração deste metal precioso, estes computadores esperam amearhar Bitcoins pela mineração de ‘números precisos’ na *blockchain*.

Enquanto se tem o controlo da respetiva chave privada, os fundos estão absolutamente seguros, o roubo e a fraude são virtualmente impossíveis. Mas, tal e qual a

nossa carteira, é necessário mantê-la segura, para prevenir possíveis roubos. Os usuários enviam Bitcoins, criando transações e submetendo-as na rede, recorrendo a *wallets*⁵.

Cada transação contém uma ou mais entradas e uma ou mais saídas. As entradas referem-se ao conjunto selecionado de transações não gastas, e as saídas contêm o endereço de Bitcoins para o qual o utilizador deseja transferir Bitcoins e o montante que o utilizador deseja transferir. Uma pequena taxa é anexada à transação de maneira a incentivar os mineiros a incluí-la nos blocos que eles criam. Uma transação para ser considerada como válida deve ter um número superior ou igual de Bitcoins na entrada como na saída, com a diferença constituída pela taxa cobrada. O usuário assina a transação com a sua chave privada associada. A transação é depois transmitida à rede da Bitcoin.

Os nós que criam blocos (mineiros), recebem o valor acumulado das taxas das transações, bem como a recompensa do bloco, que eles podem creditar nas suas próprias *wallets*.

A Bitcoin é a primeira *ledger* distribuída, em total consenso, alguma vez feita. No seu núcleo a Bitcoin é uma invenção da tecnologia e da economia. Funciona através da teoria do jogo para incentivar usuários de interesses conflitantes a colaborar na manutenção de uma única versão de um banco de dados compartilhado de transações.

A rede Bitcoin não pode ser efetivamente desligada por nenhuma autoridade do mundo, e desde a sua criação, é aceite como moeda em várias jurisdições. A Bitcoin introduziu e mostrou como a tecnologia *blockchain* funciona, como uma estrutura de banco de dados que pode mudar fundamentalmente o conceito de confiança no sistema de distribuição. Os usuários da Bitcoin não precisam confiar nos processadores das transações para agir honestamente. Por lei, eles simplesmente dependem do fato de eles agirem em seu próprio interesse.

⁵ Um tipo de software que detém a chave privada do utilizador para o propósito da assinatura

Esta tornou-se a base para outras aplicações, a maioria delas desenvolvidas em finanças. Uma série de empresas e iniciativas foram lançadas nos últimos anos que aplicam o princípio da *blockchain* a outras indústrias, entre elas o sector da energia.

3.3 Criptomoedas, *Altcoins* e *Tokens*

Criptomoedas são moedas digitais ou virtuais que são criptografadas para proteger e verificar a transferência de transações. Apesar das moedas digitais terem existido antes da Bitcoin [23], a sua criação é um marco importante no reino das moedas digitais, devido à sua natureza distribuída e descentralizada. A criação da Bitcoin precipitou a expansão de um ecossistema exuberante e mais diverso de outras criptomoedas.

Altcoins refere-se simplesmente a moedas que são uma alternativa à Bitcoin. A maioria das *altcoins* são uma variante da Bitcoin, construídas usando o algoritmo *open-source* da Bitcoin. Exemplos de *altcoins* que são variantes do código da Bitcoin são a Litecoin, Dash, Vertcoin, etc. Há outras *altcoins* que são derivados do seu próprio protocolo que apoia a sua própria moeda nativa. Exemplos destes incluem a Ethereum, Omni, Nxt, etc. A semelhança que existe entre todas as *altcoins* é que todas elas possuem a sua própria *blockchain* independente, onde as transações relativas à sua criptomoeda nativa são registadas.

Os *tokens* são considerados como criptomoedas, mesmo que a maioria destes não funcionem como uma moeda ou meio de troca. O termo criptomoeda é um equívoco, uma vez que uma moeda representa tecnicamente uma unidade de conta, uma reserva de valor e um meio de troca. Todas essas características são inerentes à Bitcoin. Qualquer outra moeda concebida após a Bitcoin é geralmente considerada como uma criptomoeda, embora a maioria não cumpra as características acima mencionadas de uma moeda real [24].

Os *tokens* são uma representação de um bem ou de uma utilidade, que normalmente reside em cima de outra *blockchain*. Os *tokens* podem representar basicamente quaisquer ativos que são fungíveis e negociáveis.

A criação de *tokens* é um processo mais fácil porque não têm de modificar os códigos de um protocolo específico ou criar uma *blockchain* a partir do zero. É apenas preciso seguir um modelo padrão na *blockchain*, tal como na plataforma Ethereum, que permite criar os

nossos próprios *tokens*. Esta funcionalidade de criar os nossos próprios *tokens* é possível através da utilização de contratos inteligentes.

Os *tokens* são criados e distribuídos ao público através de uma ‘inicial coin offer’(ICO), que é um meio de *crowdfunding*⁶, através do lançamento de uma nova *token* para financiar o desenvolvimento de projetos. É semelhante a uma oferta pública inicial (IPO) para ações.

Concluindo, a principal diferença entre *altcoins* e *tokens* é na sua estrutura. *Altcoins* são moedas separadas com a sua própria *blockchain*, enquanto os *tokens* operam em cima de uma *blockchain* que facilita a criação de aplicações distribuídas (DApps).

3.4 Transações

A *blockchain* pode ser vista como um contrato digital que permite a um indivíduo realizar e faturar uma transação (por exemplo, venda de eletricidade) diretamente (*peer-to-peer*) com outro indivíduo. O conceito P2P significa que todas as transações são armazenadas numa rede de computadores constituída pelos computadores do provedor e cliente que participam numa transação, bem como dos computadores dos muitos outros participantes da rede.

O pensamento original da *blockchain* foi que todas as transações fossem visíveis para todos os nós na rede. Nenhuma terceira parte verifica as transações, significando que o poder é distribuído pela rede. As transações são guardadas em série, cronologicamente em blocos, assim que a transação é verificada. Criptografia é usada para encriptar a informação contida na base de dados distribuída, de maneira a que a base de dados seja ‘à prova de *hackers*’,

⁶ Financiamento colaborativo de uma entidade, de um projeto ou de uma iniciativa, por meio de angariação de contribuições monetárias provenientes de vários investidores individuais, realizada tipicamente pela internet e redes sociais

isto assegura a transferência de ativos, que podem ser físicos, intangíveis ou digitais, pela rede [25].

A *blockchain* usa uma lista de registros pública, a chamada *ledger*. A rede é capaz de criar, evoluir e observar um número imutável de registros de transações. De uma perspectiva de negócios a *blockchain* é uma rede de trocas (mercado), para transacionar valores e ativos entre partes (*peers*), sem a assistência de um intermediário. De um ponto de vista legal a *blockchain* é um mecanismo de validar transações, que não requer assistência intermediária [17].



Figura 7 Sequência de processos numa transação na *blockchain* [25]

3.4.1 Funcionamento

A *blockchain* pode literalmente ser vista como uma cadeia de blocos, constituída pelos registros de todas as transações que foram feitas, em ordem cronológica. Os blocos podem ser adicionados à cadeia, mas não eliminados. Cada membro da rede *blockchain* pode copiar a cadeia de transações que foi feita anteriormente. Esta cadeia cresce a cada momento, com a adição de novos blocos e com os registros das novas transações adicionadas. A adição de um novo bloco na cadeia, requer a verificação das transações nesse bloco. Para ser válido, o bloco adicionado tem de referir o seu bloco precedente.

Quando duas partes concordam com uma transação, ela tem de especificar a informação relativa à transação, como, quem envia e quem recebe a transação, etc. A informação relacionada é criptografada e distribuída para cada nó da rede, cada um dos quais armazena os dados localmente. Um nó é um computador que está conectado com a rede *blockchain*, que coleciona novas transações, valida-as, e mete-as validadas, num bloco que tem de ser verificado antes de ser adicionado na *blockchain*.

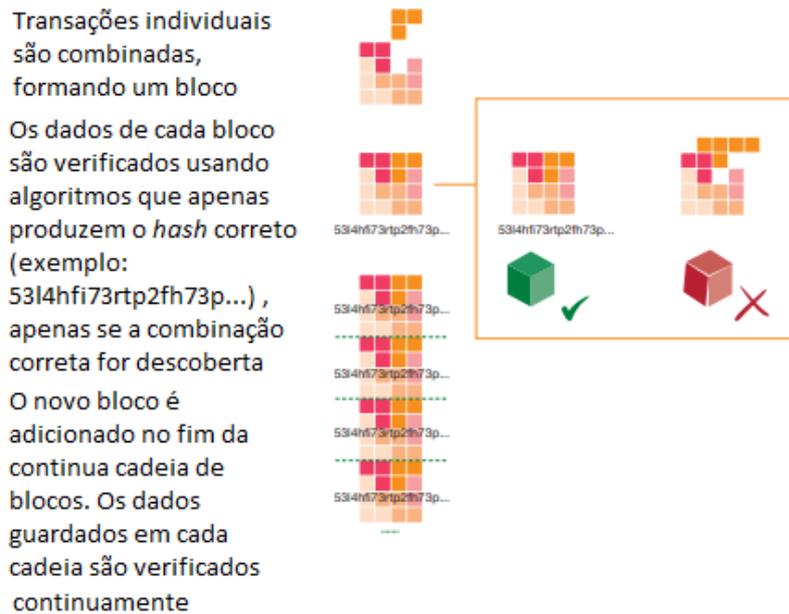


Figura 8 Validação de um bloco [25]

Os mineiros devem competir na resolução da função *hash*⁷, com a informação respetiva do bloco que criaram. Cada vez que uma transação é feita, o minerador entra em ação. Ele pega num bloco de dados e transforma-o numa sequência hexadecimal compatível com a *blockchain*, este processo pode demorar bastante tempo, dependendo do poder de processamento da máquina. Cada bloco recebe um *hash* compatível com o bloco anterior.

⁷ A função *hash* é um algoritmo utilizado pelo protocolo da Bitcoin para transformar um grande número de informações em uma sequência numérica hexadecimal de tamanho fixo. No caso das criptomoedas, cada *hash* é criado com o auxílio de um algoritmo duplo-SHA-256, que cria um número aleatório de 512bits.

Logo, se um bloco já adicionado à *blockchain* for modificado para criar uma transação falsa, o *hash* dele será também modificado. Se cada bloco é construído a partir de informações do bloco anterior, uma modificação na *blockchain* afetaria toda a cadeia. Isso aumenta a capacidade de se identificarem fraudes e a manter o sistema livre de falhas.

Para impedir que *hashs* compatíveis sejam feitos em larga escala (aumentando rapidamente o número de moedas em circulação e diminuindo o valor da Bitcoin a longo prazo), a função *hash* foi programada para tornar a busca por *hashs* compatíveis mais difícil, por meio de um processo chamado *proof of work* (PoW).

Uma vez que um mineiro encontre a solução, o seu bloco é transmitido aos outros nós da rede. Se estes aceitam o novo bloco, eles usam o *hash* novo para começarem um novo enigma de maneira a se construir um novo bloco baseado em novas transações adicionadas. Quanto mais poder computacional os mineiros têm, maiores são as chances de resolver o enigma primeiro. O processo que é aqui descrito é uma típica descrição de um processo de transações via *blockchain*, como a Bitcoin. A maior parte dos processos de trabalho na *blockchain*, são de acordo com o mesmo processo, contudo os detalhes mudam.

3.5 Blockchain pública, privada e híbrida

A maioria das *blockchains* são inteiramente abertas ou sem permissão. Isto significa que qualquer pessoa tem acesso à *blockchain* e pode interagir com a rede. Todos podem ler a *blockchain*, enviar transações e participar no processo de consenso. Estas *blockchains* são designadas públicas.

Nas privadas, é requerido aos participantes que tenham certas credenciais para terem acesso à *blockchain* e para serem capazes de interagir. Existem algumas *blockchains* privadas, onde só uma organização tem o direito de escrever. Outras são autorizadas, mas não completamente centralizadas. Estas últimas, são referidas como híbridas ou *blockchain* de consórcio. Aqui o processo de consenso pode ser controlado por um consórcio de organizações ou instituições, e o direito de ler pode ser público ou privado.

Blockchains privadas têm diversas vantagens em relação às públicas. Primeiramente, as validações numa *blockchain* privada são conhecidas, o que leva a menor risco. Segundo, as transações são mais baratas devido à diminuição dos nós, no processo de validação. Além disso, se ocorrer uma falha, os nós podem ser facilmente corrigidos manualmente. Por

último, *blockchains* privadas permitem mais privacidade, especialmente para organizações e instituições para que estas vantagens são apelativas. Contudo, alguém pode argumentar que as *blockchains* privadas não operam de acordo com os princípios básicos da *blockchain*. As *blockchains* privadas não se podem dizer descentralizadas, já que existe uma organização ou grupo de organizações no controlo da rede.

3.6 Modelos de consenso

3.6.1 Problemas dos generais bizantinos

A Bitcoin reclama ter resolvido o problema chamado “dos generais Bizantinos”, que até então era insolúvel. O problema é: ‘como é que se têm a certeza que múltiplas entidades, separadas por uma distância, estão absolutamente de acordo, antes de uma ação ser tomada?’ Noutras palavras, como podem partes individuais encontrar maneira de garantir consenso total? Este problema é muitas vezes representado pelo problema dos generais bizantinos, que de maneira a ter sucesso no ataque a uma cidade, necessitam que todas as tropas ataquem em simultâneo.

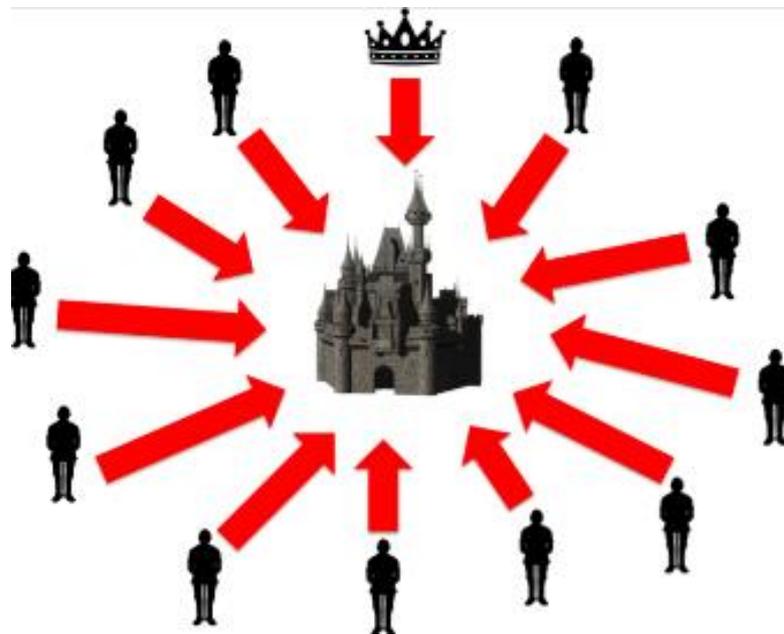


Figura 9 Problema dos generais Bizantinos

De maneira a atacar coordenadamente, ao mesmo tempo, uma solução, por exemplo, seria enviar mensagens, através de cavaleiros. Mas, e se forem capturados ou mortos antes de uma mensagem chegar? Seria necessário a confirmação dos próprios cavaleiros, de maneira a ter a certeza que a mensagem foi entregue. E se a mensagem for ‘aldrabada’, devido à captura do cavaleiro, induzindo ao erro? Como os generais vão saber se a mensagem é verdadeira? Como confiar nos outros generais, em que realmente não são traidores, e que vão mandar mensagem de confirmação, quando a verdadeira intenção poderá ser bater em retirada? Como se pode ter absoluta certeza que todos os batalhões vão chegar a consenso total e vão atacar simultaneamente? Este problema, insolúvel há décadas, é basicamente, indivíduos (partes interessadas) serem capazes de confiar uns nos outros diretamente, sem outras condições [26].

Agora, imagine-se que os batalhões são computadores numa rede e que os generais são cópias do programa, que corre a *ledger*, que via o complexo problema matemático, regista transações e eventos na ordem exata em que acontecem. A chave é que todas estas *ledgers* são exatamente as mesmas, para toda a gente. Assim que uma alteração é feita, e é provado ser verdadeira (recorrendo à matemática), todas as outras cópias são atualizadas de maneira a corresponder. O que temos aqui é um registo distribuído que está sempre em consenso.

A Bitcoin é a primeira *ledger* distribuída em consenso total, e pode ser expandida por todo o planeta bastando um dispositivo e uma ligação à internet. Isso significa que diferentes indivíduos em lugares distintos podem chegar a um consenso num evento sem a necessidade de uma terceira parte como intermediário de confiança, não importa se é uma ordem de um general para as suas tropas ou se é uma compra de um ativo. A *ledger* distribuída confirma, via matemática, se um evento é verdade e regista-o permanentemente. Portanto, a Bitcoin é uma máquina de confiança.

Hoje, devido à evolução que estes tipos de sistemas têm sofrido, já existem inúmeros protocolos de consenso, cada uma com vantagens e desvantagens. Recomenda-se a leitura de [27] para uma melhor compreensão sobre a maioria dos protocolos existentes atualmente. O objetivo do processo de verificação é alcançar consenso sobre o conteúdo da *ledger*. A verificação baseada em consenso é descentralizada e processada automaticamente. Os dois mecanismos mais comuns são o *Proof-of-Work* (PoW) e o *Proof-of-Stack* (PoS). Já existem

protocolos mais sofisticados, mais rápidos e mais escaláveis, e espera-se que novos protocolos apareçam aumentando a utilidade da *blockchain* no geral.

3.6.2 *Proof-of-Work*

Proof-of-Work é um modelo de consenso do tipo tolerante a falhas Bizantinas. Os sistemas tolerantes a falhas Bizantinas são sistemas impermeáveis às mesmas, um tipo de falha em que um nó defeituoso está restrito a comportamentos defeituosos simplistas, por exemplo, perda de rede. Estes sistemas são (até certo ponto) tolerantes a falhas que incluam qualquer tipo de comportamento mal-intencionado de um nó.

Aquando da criação de blocos, os computadores não estão a selecionar a mesma quantidade de transações e os blocos por eles criados não são todos do mesmo tamanho. Alguns contêm mais transações, alguns menos, e quando os blocos são descartados, por não terem sido os blocos vencedores, as transações que eles continham voltam para a pilha de transações não confirmadas. Isto significa que a probabilidade de uma transação ser confirmada e ficar na ordem em que foi confirmada não é absoluta, mas torna-se cada vez mais certo a cada dez minutos (no caso da Bitcoin), cada vez que um novo bloco é adicionado, de facto, é sugerido que se espere seis ou mais blocos até ter a certeza que o pagamento é permanente, cerca de 60 minutos. Ou seja, este processo é lento, porquê? Porque o sistema é desacelerado propositadamente.

Devido à dificuldade de achar a resposta ao problema matemático, poder-se-á pensar que a probabilidade de dois computadores ganharem ao mesmo tempo é baixa, no entanto, ocorre regularmente. Isto é chamado, *soft fork*, e quando acontece, todos os computadores da rede recebem os dois blocos e são instruídos a criar blocos que se vão ligar ao bloco que primeiro receberam, mas devido à velocidade da internet e outros fatores, computadores diferentes podem receber primeiro diferentes blocos, quebrando a correta ligação (ordem) dos mesmos, aquando do novo bloco, dez minutos depois.

Nestes casos, a cadeia mais longa é a que fica, e a mais curta é descartada, bem como todas as transações não confirmadas que continham. Esta *soft fork* é a razão pela qual o sistema tem de ser desacelerado de propósito, via o problema matemático, pois se não fosse desacelerado o sistema estava constantemente a ser bifurcado e não haveria consenso.

Ninguém saberia qual a *ledger* correta e todos os computadores estariam ocupados a construir novos blocos e a criar diferentes ligações. Ou seja, em vez de uma cadeia de blocos seria uma árvore de blocos. A lentidão do processo e a exigência de uma imensidade de energia computacional são indispensáveis para manter a Bitcoin e outras *altcoins* em consenso total. Assim, sempre que mais poder computacional é adicionado à rede, o sistema ajusta automaticamente a dificuldade do problema, aumentando-a, o que aumenta também a energia necessária para o resolver.

3.6.3 Discussão do modelo *Proof-of-Work*

Uma vez que a *Proof-of-Work* é alcançada através de esforços computacionais, tem um custo mensurável associado a ele. Como os mineiros trabalham para resolver a prova, são incentivados pelo valor da recompensa do bloco e pelas taxas de transação, o seu lucro deriva da sua taxa *hash* versus os seus equipamentos e custos de eletricidade. Isso resultou numa competição entre os mineiros, para desenvolver hardware mais económico, passando de CPU's para GPU's, para FPGA e para mineração ASIC.

A taxa de *hash*⁸ total da rede Bitcoin é, no momento da escrita, 25,000,000,000GH/s. Se assumirmos que no hardware de mineração mais eficiente no mercado é usado o Antminer S9, que possui uma eficiência de 0.1J/GH, a rede da Bitcoin consome aproximadamente 21.9TWh⁹ por ano. Deve-se notar que o mineiro S9 é recente, e é mais eficiente que os seus equivalentes mais antigos, portanto, não é improvável que o consumo real de energia da rede Bitcoin seja significativamente maior. Derivado a esses custos, pode-se argumentar que a PoW é um mecanismo de consenso ambientalmente hostil, devido ao excessivo desperdício de energia.

⁸ Taxa de *hash* é o número de *hashes* que pode ser executado por um mineiro em um determinado período de tempo (geralmente segundos)

⁹ $25000000000 \text{ GH/s} \times 0.1\text{J/GH} = 2500000000 \text{ J/s} = 2500000000\text{W}$
 $2500000000 * 24 \text{ horas} * 356 \text{ dias} = 21,9 * 10^{12} \text{ Wh/ano} = 21.9\text{TWh/ano}$



Figura 10 Taxa de *hash* da rede Bitcoin [28]

Como a mineração é altamente competitiva, a probabilidade é extremamente baixa para o mineiro que executa uma modesta operação de resolução do problema matemático antes do resto da rede. Assim, a maioria dos mineiros juntam-se às ‘piscinas de mineração’, onde são pagos pelo administrador dessa ‘piscina’ proporcionalmente à taxa de *hash* adicionada com que eles contribuem. Como a probabilidade de resolver a prova de trabalho distribuído é maior, a ‘piscina’ pode ganhar a recompensa do bloco mais regularmente e assim distribuir os ganhos a um ritmo constante entre os mineiros individuais.

O sucesso das piscinas de mineração, tem infelizmente causado o efeito lamentável da centralização da rede Bitcoin, com 81.6% da taxa de *hash* total composta por apenas cinco ‘piscinas’.

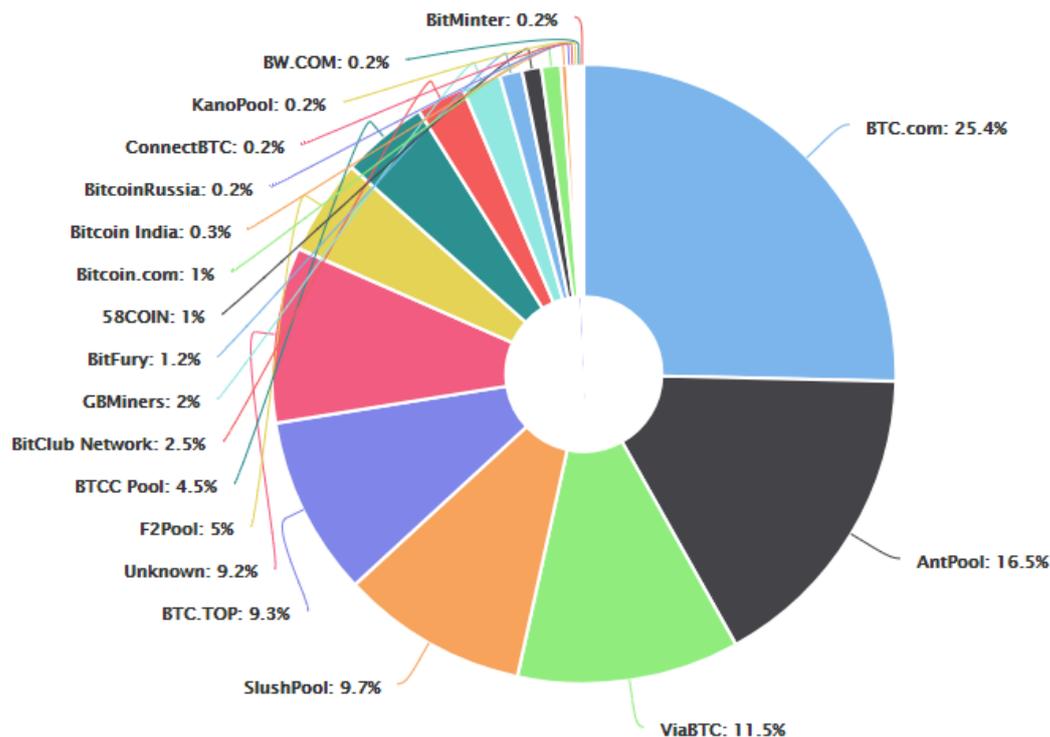


Figura 11 Percentagem da taxa de *hash* total das piscinas de mineração [29]

O efeito da rede de mineração em piscina pode ser problemático para as aspirações descentralizadas da Bitcoin, uma vez que é o administrador da piscina que escolhe quais as regras do protocolo a seguir e quais as transações a incluir na cadeia de blocos. Embora os *hashers* ainda tenham a capacidade de alterar as ‘piscinas’, se eles não suportarem os parâmetros do administrador, esses esforços são frequentemente impedidos pela inércia. Assim, pode-se concluir que a resistência à censura da rede está ameaçada pela centralização da mineração.

O debate sobre os méritos da PoW deu origem ao desenvolvimento de uma diversidade de outros modelos de consenso, cada um com características diferentes e desempenho variáveis, dependendo do tipo de sistema que é aplicado. Assim, é importante notar que o modelo de consenso PoW foi projetado para se adequar às necessidades específicas da Bitcoin, e, embora este modelo de consenso tenha vantagens notáveis em aplicações de criptografia, não abrange necessariamente as necessidades de todas as aplicações de tecnologia *blockchain*.

3.6.4 *Proof-of-Stake*

O principal objetivo de um protocolo de consenso é a rede distribuir o direito de criar um bloco, justamente, entre os nós. Como visto anteriormente, a PoW consegue isso porque ela seleciona aleatoriamente um mineiro com uma probabilidade proporcional à participação do mineiro no poder de processamento através de leis matemáticas.

Prove-of-Stack (PoS) é um modelo de consenso que visa fornecer o mesmo tipo de equidade na distribuição do consenso sem exigir que os mineiros queimem recursos. Neste esquema, os mineiros competem com a quantidade de participação na rede (*stake*) em vez de poder de processamento [30].

PoS emergiu como uma alternativa ao PoW. A vantagem principal é o preço das computações. O algoritmo usado não é um verdadeiro mecanismo de mineração, mas ao invés depende da mineração virtual, também chamada de *minting*. Noutras palavras, os usuários precisam de providenciar a evidência da propriedade da criptomoeda. É energeticamente mais eficiente, porque é baseado no total de participação que cada um detém. Por exemplo, se a pessoa 1 tem 5% de quota, a pessoa 1 pode validar 5% das transações. Para cada transação, algoritmos escolhem o validador, aleatoriamente, de acordo com a sua quota.

A participação neste exemplo refere-se geralmente à posse de *tokens* nativos do sistema. A forma proposta de medir a participação, envolve *tokens* de bloqueio por um período. PoS é nesse sentido usada para provar o compromisso e exposição à rede.

No caso em que a *stack* é bloqueada, criando um bloco contendo más intenções que é, conseqüentemente, rejeitado pela rede, resulta na perda dessa mesma *stack*. Seguindo os mesmos princípios da PoW, para variações em que a *stack* não é imediatamente perdida, os atacantes ainda precisam de acumular mais de metade da participação da rede para manipular a cadeia com sucesso. Desta forma, os protocolos da PoS também são protegidos por um custo de ataque de forma similar à PoW.

Através deste esquema, uma rede pode chegar a consenso sem o gasto de energia dispendiosa associada à PoW. Mais ainda, este método evita a latência do tempo de confirmação inerente à PoW, uma vez que os mineiros não precisam de realizar qualquer problema matemático de forma a fornecer a prova. No entanto, uma vez que a PoS incentiva

os mineiros a manterem os seus *tokens* para competir pela recompensa do bloco, a PoS ainda apresenta um custo, embora obscurecido. Nomeadamente no que diz respeito à liquidez do mercado e ao facto de que os mineiros assumem os dois custos, o de risco e o de oportunidade no bloqueio do seu capital, o que, embora mais difícil de medir, continua a ter um custo. Além disso, a teoria económica infere que os mineiros irão continuar a bloquear mais capital, desde que seja lucrativo fazê-lo, o que significa que qualquer custo da PoS ou de qualquer outro modelo de consenso coincidirão sempre com os incentivos e receitas de modelos de lucro para os mineiros.

3.6.5 Protocolo Ripple

Ripple é um protocolo de pagamento desenvolvido pela companhia com o mesmo nome e é a mais proeminente *ledger* de consenso, que usa a sua própria criptomoeda, XRP (a terceira maior criptomoeda do mercado atual), como moeda nativa. Este protocolo, em contraste com a *blockchain*, mantém a noção de contas, em vez da noção de chaves públicas, que o protocolo da Bitcoin usa [31].

Similar aos outros modelos de consenso anteriormente discutidos, que são estritamente orientados para blocos, a *ledger* da Ripple, que contém a informação de todas as contas Ripple, é atualizada por uma rede, em consenso, na próxima fornada de transações. Contudo, em contraste com as outras redes, a rede da Ripple é uma rede onde cada nó decide quem ele quer usar para obter consenso a partir da *ledger* atual.

O conjunto destes nós é chamado ‘lista de nós únicos’ e a Ripple usa esse conjunto de nós num processo de votos onde os nós confiáveis votam em várias rodadas para decidir quais as transações que devem ser incluídas na última fornada da *ledger*. Um *hash* assinado do conjunto vai ser transmitido, e vai ter de ser formada uma maioria por todos os nós na rede. Cada nó na rede coleta todas as transações válidas que ainda não foram registadas na *ledger* e compila-as num ‘conjunto candidato’.

Este conjunto candidato é depois distribuído pela rede. Dado que cada nó apenas considera a opinião dos nós na sua ‘lista de nós únicos’ desconsidera qualquer conjunto candidato recebido de nós que não constem nessa lista. Realiza-se uma ou mais rondas de votos até certo limite, de acordo sobre as transações nos conjuntos de candidatos. Para

garantir que todos os nós têm a mesma *ledger*, um sinal (um *hash*), é transmitido a cada nó e não vai considerar a última ronda até a maioria (80%) ser atingida.

Embora apenas um conjunto predefinido de nós seja usado no processo de geração de cada atualização à *ledger*, não é o mesmo conjunto usado para toda a rede, cada indivíduo decide em quem quer confiar. Enquanto a rede estiver suficientemente interconectada é muito provável seja que alcançada uma maioria. Aquando da ocorrência de falhas de consenso em *ledgers* suficientemente interconectadas é muito provável que a causa seja por problemas de latência ou inconsistência nas transações. Nestes casos o processo de consenso é simplesmente reiniciado.

O algoritmo de consenso da Ripple não usa uma cadeia de blocos para registar todas as transações. Em vez disso, utiliza uma estrutura clássica de banco de dados que apenas regista as transações mais recentes e as atuais contas e saldos. Embora isso ofereça um armazenamento mais eficiente, também significa que as transações não são rastreáveis.

3.7 Tipos de aplicação

A *blockchain* por si só não é um produto que as pessoas vão usar, mas a tecnologia que proporciona novos produtos, que as pessoas podem usar. As pessoas podem ou não saber que a *blockchain* está por detrás do produto. Um exemplo disso é a própria Bitcoin. Muitas vezes, a *blockchain* é confundida com sendo a mesma coisa que a Bitcoin. A diferença, todavia, é que a Bitcoin é uma aplicação, baseada na tecnologia *blockchain* e esta, é a tecnologia na base da qual a Bitcoin, como aplicação, foi construída.

A Bitcoin foi a primeira aplicação da tecnologia *blockchain*, mas atualmente existem numerosas possibilidades de aplicações desta tecnologia. Podem ser identificadas três categorias de possíveis aplicações baseadas em *blockchain*, com base no seu estágio de desenvolvimento. Primeiro, há a categoria das criptomoedas, esta categoria é frequentemente referida como *Blockchain 1.0*. A Bitcoin continua a ser a aplicação mais conhecida pelo público em geral, contudo, apesar do fato de ter atingido valores bastante altos para qualquer criptomoeda, a quota absoluta de transações de Bitcoin nos mercados internacionais de câmbio ainda é mínima. De momento, não existe indicação de que a Bitcoin possa vir a alcançar as dimensões de outras moedas internacionais.

O segundo tipo de aplicações são as que permitem modelos de contratos inteligentes, que pertencem à categoria *Blockchain 2.0*. Um contrato inteligente permite executar processos automaticamente, através de condições predefinidas, do género de, “se isto, então aquilo”. Basicamente, um contrato inteligente é o código que permite um acordo contratual programado entre partes. Ao passo que a *blockchain 1.0* pode ser vista como a tecnologia para a descentralização do dinheiro e dos pagamentos, a *blockchain 2.0* pode ser vista como a tecnologia da descentralização de mercados. Por exemplo, é possível criar um sistema de contratos inteligentes, totalmente automatizado, entre um produtor de energia e um consumidor, que automaticamente regula o fornecimento e o pagamento. Se o cliente não fizer o pagamento, o contrato inteligente suspende automaticamente o fornecimento de energia até que o pagamento seja recebido, desde que as partes tenham um acordo feito anteriormente, que envolva tal mecanismo no contrato.

Finalmente, as aplicações distribuídas (DApp) são denominadas como *Blockchain 3.0*. Em contraste com uma aplicação tradicional, que tem o seu código a ser executado em servidores centralizados, as DApps têm o seu código a correr numa rede P2P descentralizada.

Recentemente, há ainda quem se refira à *blockchain 4.0*. Com as bases estabelecidas pelas versões anteriores, a *blockchain 4.0* refere-se a soluções utilizáveis na indústria 4.0. Isto é, utilizáveis na quarta revolução industrial, que engloba tecnologias de automação, troca de dados, IoT e computação em nuvem. Esta revolução industrial exige um grau crescente de confiança e proteção de privacidade, e é aqui que a *blockchain* entra em ação. Ao adicionar a *blockchain* às tecnologias da informação, as máquinas podem, por exemplo, fazer um pedido de peças de reposição de forma segura e autónoma. Outra vantagem é que as bases de dados podem ser partilhadas entre diferentes aplicações, garantindo que o tratamento correto (remuneração) seja dado à pessoa certa (quem tem o direito sobre os dados). Não estamos assim tão longe de ver um dia em que todas as corporações usam redes *blockchain* para se manterem competitivas face a rivais do mesmo ramo, que fazem o mesmo.

3.8 Contratos inteligentes

Os contratos inteligentes são vistos como a segunda geração da *blockchain*, que habilitam e executam a negociação de um contrato. Este software evolui a utilização da *blockchain* uma vez que uma simples *ledger* passa a permitir executar automaticamente contratos com várias partes. Qualquer usuário do sistema pode criar um contrato com as suas próprias regras e especificações. Com a gravação na *blockchain*, e uma vez que o contrato é fixo, não será possível alterá-lo.

3.8.1 Funcionamento

Os contratos são construídos no topo de uma plataforma subjacente a uma criptomoeda. Esta interface principal fornece a *blockchain*, executada por todos os nós, impondo a ordem das transações enviadas e a base de dados que guarda o estado dos contratos [32].

Um contrato inteligente consiste em código programado, um arquivo de armazenamento e um saldo de conta. Os usuários podem enviar dinheiro ou dados para um contrato. Este será validado consoante as regras predefinidas do sistema. Todos os dados são públicos, e ninguém pode ser impedido de enviar transações e obter a sua inclusão na *blockchain* [32].

Os princípios de funcionamento de um contrato inteligente são parcialmente semelhantes aos da Bitcoin, no entanto, existem algumas diferenças significativas. Na Bitcoin, a transação apenas pode ser feita por uma entidade que tenha em sua posse uma chave privada, enquanto que uma transação do contrato inteligente também pode ser criada por uma conta de contrato, e tem o seu próprio código armazenado na conta. A transação do contrato inteligente pode conter tanto dados como valor. Se o recetor de uma transação é um contrato, pode enviar uma resposta à mensagem.

A lógica do programa (contrato) é executada pela rede de mineradores que chegam a um consenso quanto ao resultado da execução do mesmo e atualizam a *blockchain* adequadamente. O código é executado sempre que recebe uma mensagem ou dinheiro, seja de um usuário ou de outro contrato. Ao executar o código, o contrato pode ler e gravar no seu arquivo localizado na *blockchain* [32].

```

1 data Alice, Bob
2 data deadline, threshold
3
4 # Not shown: collect equal deposits from Alice and Bob
5 # We assume StockPriceAuthority is a trusted third party contract that can give us the price
  ↪ of the stock
6
7 def determine_outcome():
8     if block.timestamp > deadline:
9         price = StockPriceAuthority.price()
10        if price > threshold:
11            send(Alice, self.balance)
12        else:
13            send(Bob, self.balance)

```

Figura 12 Exemplo de um contrato inteligente [30]

Há muitos benefícios nos contratos inteligentes baseados em *blockchain*. Em primeiro lugar, um contrato inteligente oferece velocidade e precisão nos negócios, além disso, o risco de manipulação, o não cumprimento, ou erros podem ser eliminados com o processo descentralizado de execução. Tal como a Bitcoin, os contratos inteligentes também não exigem intermediários de terceiros para confiança. Por conseguinte, os contratos inteligentes podem reduzir os custos, uma vez que não necessitam de tanta intervenção humana e requerem menos intermediários. Finalmente, os contratos inteligentes podem criar negócios, operações e modelos de negociação, por exemplo, de energia renovável P2P ou acesso automatizado a veículos e unidades de armazenamento [33].

3.9 Aplicações descentralizadas, DApp

Aplicações descentralizadas são aplicações que representam contratos entre a rede e os utilizadores, e nas quais corre um registo distribuído, a chamada *ledger*. O que faz destas aplicações especiais é que nenhuma organização controla esses contratos ou detém nenhum direito legal sobre as mesmas, mas todas as decisões são tomadas em consenso entre os usuários com base em código computacional.

Uma DApp tem o seu código a correr numa rede P2P descentralizada, em vez de servidores centralizados. Para uma DApp ser considerada como tal deve ser *open-source*, e operar autonomamente, ou seja, sem qualquer entidade a controlar a maioria dos *tokens*. A aplicação deve adaptar o seu protocolo consoante o *feedback* e propostas do mercado, mas essas mudanças devem ser decididas em consenso com os utilizadores. Os dados e os registos

de operação da aplicação devem ser armazenados criptograficamente numa *blockchain* pública. A aplicação deve usar um *token* que é necessário para o acesso à própria e qualquer contribuição de valor deve ser recompensada nos *tokens* da própria aplicação. Os *tokens* devem ser gerados de acordo com um algoritmo padrão [34].

A Ethereum é o exemplo mais popular de contratos inteligentes e criação de DApps. Pode ser usada para várias utilidades, como podemos ver na Tabela 17, do Anexo B.

4 Aplicação da *blockchain* aos SEE

A *blockchain* é considerada como uma das incertezas mais críticas dentro da digitalização da rede e é vista como uma tecnologia com impacto e incerteza elevados. A *blockchain* tem o potencial para mudar a maneira como organizamos, registamos e verificamos as transações, mudando o modelo, de uma estrutura centralizada para sistemas descentralizados. Não é surpresa que, fora do sector financeiro, o sector da energia seja visto como uma das indústrias em que a *blockchain* poderia ter um maior impacto transformador e disruptivo [35]. A energia está à frente de muitas outras indústrias na adoção da *blockchain* e, apesar de ainda estar num estágio inicial no processo de inovação, o sector energético já está bastante avançado em comparação com outras indústrias. Por tudo isso, o sector da energia está entre os mais avançados na adoção da *blockchain*, conduzindo assim a uma maior eficiência dos processos existentes, assim como a apoiar e acelerar a transformação da energia em direção a modelos de negócio mais descentralizados.

Atualmente, grandes grupos globais e *startups* estão a desenvolver aplicações com a tecnologia *blockchain*. O foco tem sido a otimização de processos em trocas de energia P2P. A maioria destes projetos ainda está na sua fase inicial. Este capítulo é um ponto de partida para a discussão do que pode acontecer, mas não procura definir o que deve ou vai acontecer. Iremos expor o que *utilities* tradicionais já desenvolveram e implantaram bem como novas *startups* que surgiram e estão agora no mercado.

4.1 Desenvolvimentos e tendências atuais

4.1.1 Pagamentos com criptomoedas

À medida que as criptomoedas ganharam força globalmente, houve *utilities* que procuraram oferecer soluções variadas de pagamento para os seus clientes. Na Holanda, a fornecedora de energia BAS Nederland, tornou-se a primeira empresa de energia a aceitar pagamentos em Bitcoin [36]. Desde então temos visto outras empresas a adotar a mesma estratégia, como por exemplo a Enercity em Hanôver [37].

Na África do Sul, a *startup* Bankymoon, lançou um projeto de inovação social que permite a qualquer pessoa ‘enviar’ eletricidade, água e gás para qualquer outra pessoa no

mundo, em qualquer lugar. Os consumidores recarregam os contadores inteligentes pré-pagos criados pela própria *startup*, usando criptomoedas. Estes pagamentos podem ser liquidados automaticamente, usando contratos inteligentes, evitando assim atrasos de pagamento. Todos os contadores ‘pré-pagos’ instalados por esta *startup* têm endereços dedicados a receber criptomoedas, os quais qualquer pessoa pode usar para enviar fundos. Por exemplo, uma escola sem fundos, obtém a eletricidade de que necessita por meio de doações ou autofinanciamento [38]. O ecossistema ganha assim um caso de uso legítimo na vida real, na forma de contadores inteligentes.

4.1.2 Negociações P2P

O comércio de eletricidade com vizinhos, dentro da mesma micro-rede comunitária, é talvez a aplicação da *blockchain* no sector mais reconhecida pelo público. A LO3 Energy criou a primeira plataforma no mercado de energia P2P em Brooklyn. Em parceria com a Siemens, esta *startup* americana criou o Brooklyn Micro Grid Project, em 2016. Este foi o primeiro projeto a realizar trocas de energia entre dois consumidores por meio de uma plataforma descentralizada baseada na tecnologia *blockchain*. A Dapp Exergy, por eles criada, recorre a contadores inteligentes que registam a produção e o consumo e, compartilham essas informações recorrendo à Dapp, realizam transações entre eles na *blockchain* e contribuem na computação necessária para a verificação de transações [39].

A micro-rede de Brooklyn reinventa o modelo tradicional, com o conceito de rede de energia comunitária. Enquanto o provedor de serviços públicos ainda mantém a rede elétrica que fornece energia, a energia gerada é armazenada na rede comunitária e é comercializada localmente por membros da comunidade. Este projeto é a primeira versão de um novo tipo de mercado de energia operado pelos consumidores, que mudará a forma como geramos e consumimos eletricidade.

No mesmo ano, a Vattenfall da Holanda, anunciou o lançamento da *startup* Powerpeers [40], criando assim uma plataforma onde os usuários podem oferecer a sua produção excedente a outros participantes. Estes podem escolher a quem comprar a eletricidade e podem verificar na internet quanta energia está a ser providenciada por cada fornecedor escolhido.

Em 2018, no Japão, a TEPCO, o maior fornecedor de energia do país, decidiu investir na Electron, uma provedora de soluções da tecnologia *blockchain* no sector da energia do Reino Unido [41]. Em parceria exploram o potencial de alterar a estrutura centralizada para sistemas descentralizados de energia, de modo a serem mais eficientes, flexíveis e confiáveis. Eles preveem que milhões de novos ativos vão estar ligados à rede, ao nível da distribuição e transporte, antevendo, assim, a necessidade de criar uma infraestrutura robusta, compartilhada, que possa identificar e registar as propriedades dos novos ativos.

A Enerchain, é um grupo que congrega aproximadamente 40 empresas do sector da energia, incluindo a EDP. Eles estão a desenvolver uma *blockchain* privada, operada pela Ponton [42]. A aplicação criada procura automatizar os processos de gestão da rede e de comercialização de energia P2P. O objetivo é acelerar e sincronizar as atividades dos parceiros de mercado e a ferramenta P2P permitirá desenvolver o comércio energético europeu na *blockchain*, sem operação de terceiros.

4.1.3 Distribuição otimizada de energia solar e eólica

Em 2017, na Alemanha, a Sonnen, em parceria com a TenneT, criaram uma linha de transmissão virtual que usa a *blockchain* para armazenar o excesso de energia de parques eólicos e solares em milhares de baterias residenciais descentralizadas [43]. Do ponto de vista da Sonnem, a tecnologia evita “engarrafamentos” nas redes elétricas. Para a operadora de sistemas de transporte TenneT a *blockchain* é uma fonte de economia, já que reduz o uso de sistemas caros de balanceamento. A tecnologia de gestão de energia também deve ter impacto sobre as perdas de transmissão, uma vez que a *blockchain* otimizaria o consumo de energia renovável gerada localmente e, assim, reduziria a transmissão maciça de eletricidade de uma região para outra. A *blockchain* apresenta ao operador da TenneT uma visão da flexibilidade disponível, pronta para ser ativada ao pressionar um botão, após o qual a *blockchain* regista a contribuição das baterias. Isso permitirá que a Sonnen e a TenneT apoiem a integração de fontes de energia renováveis no sistema de fornecimento de eletricidade da Alemanha.

4.1.4 Cobrança e compartilhamento de infraestruturas e VE

O compartilhamento de infraestrutura de cobrança é talvez uma das maiores oportunidades de curto prazo para a tecnologia no sector. Em 2016, o banco suíço UBS uniu-se à empresa alemã RWE e à empresa de tecnologia ZF para criar *wallets* para VE, de modo

a transacionarem via *blockchain* [44]. O objetivo é permitir aos proprietários pagar enquanto usufruem de infraestruturas privadas, para carregamentos, estacionamento, portagens, e também receber taxas ao partilhar o automóvel, por exemplo. Eles estudam também a hipótese de que haverá uma economia de máquina para máquina, em que estas podem transacionar entre elas.

De forma similar, na Holanda, a Vandebroon, trabalha num projeto com a TenneT, para trabalhar com clientes em comum que tenham VE. A Vandebroon disponibiliza a capacidade das suas baterias para ajudar a TenneT a equilibrar a rede [45].

4.1.5 Energia renováveis

Têm vindo a surgir imensas criptomoedas renováveis. Isto é *tokens* que representam a produção de energia renovável. A SolarCoin, por exemplo, visa motivar os consumidores de eletricidade a utilizar energia renovável, recompensando-os com SolarCoins. Esta empresa está a incentivar a geração de energia solar. O *token* SolarCoin é 99% distribuído para produtores de energia solar, providenciando aqui a ‘PoW’ do sistema [46]. A WePower, sediada em Gibraltar, construiu uma plataforma de negociações de energia renovável descentralizada que providencia sinais de mercado e incentivos financeiros, dependendo da disponibilidade de renováveis [47]. A Volt Markets, nos Estados Unidos, por exemplo, quer usar os contratos inteligentes da Ethereum para emitir e rastrear certificados energéticos renováveis [48]. A M-PAYG, na Dinamarca, tem como objetivo melhorar o acesso à energia renovável para pessoas que vivem abaixo da linha da pobreza nos países em desenvolvimento, usando a *blockchain*. Eles estão a desenvolver soluções de energia pré-paga em pequena escala [49]. Na Eslovénia, foi criado um mercado de energia renovável criado por especialistas em energia e profissionais de inteligência artificial, chamado SunContact. Os produtores de energia renovável podem vendê-la diretamente para os clientes sem qualquer intermediário, recorrendo a contratos inteligentes [50]. A ADptEVE é uma aplicação que, com o auxílio da inteligência artificial, otimiza a energia solar de casas usando a *blockchain* para gravar e fazer transações [51].

4.1.6 Eficiência Energética

A eficiência energética pode também ser melhorada com a ajuda da *blockchain*, ao remunerar usuários da rede que tenham boas práticas energéticas. Foi neste contexto que a

Energimine criou um mercado de energia descentralizado com uma plataforma que recompensa os usuários por comportamentos que promovam a eficiência energética [52].

Em março de 2017, a Energy-Blockchain Labs, sediada em Pequim, associou-se à IBM para melhorar a eficiência no mercado nacional de carbono da China. O principal benefício para as empresas que usam a solução *blockchain* é gerir os seus ativos de forma mais eficiente, permitindo uma redução de custos de até 30% [53].

4.1.7 Mercado grossista de eletricidade

Outra área muito promissora para a aplicação da tecnologia *blockchain* na indústria, é na área de negociação e liquidação no mercado grossista. Em 2016, surgiu o primeiro mercado europeu de energia usando a tecnologia *blockchain*. Os negócios foram executados pela Yuso e pela Priogen Trading. Ambos usaram a plataforma Enerchain para transacionar energia [54].

Outro exemplo é o projeto NEW 4.0. que é visto como o começo a partir do qual se desenvolverá uma infraestrutura de energia totalmente renovável para a Alemanha. A função principal será equilibrar a oferta e a procura entre produtores de energia renovável e consumidores. O serviço permite registar e armazenar transações com a ajuda da *blockchain*. Os processos *Business-to-Business* (B2B) industriais podem ser melhorados com vista a terem maior confiabilidade, maior desempenho e melhor rastreabilidade. No entanto, isso requer uma transformação de processos, interfaces e aplicativos que um único participante não pode impor a um sector inteiro. As empresas que colaboram no projeto acreditam que é necessário desenvolver e implementar novos padrões e regulamentos no sector para que a transformação de energia renovável regional da Alemanha e da União Europeia seja bem-sucedida [55].

A Wien Energie, o maior conglomerado de serviços públicos da Áustria, em parceria com a *startup* BTL, anunciou que estão a trabalhar no comércio de energia ao lado de outras *utilities* [56]. Eles querem explorar novos caminhos para rastrear ativos de energia, com o objetivo de reduzir o custo de operação. Estão também a trabalhar numa plataforma de negociações de energia, com o objetivo de posicionar a empresa para o lançamento em grande escala da tecnologia *blockchain* nos próximos anos[57].

Na Itália, a maior distribuidora de eletricidade e gás, a Enel, fez uma parceria com a Ponton, empresa alemã de *software* para empresas, para desenvolver um mercado grossista descentralizado de energia na Europa. A primeira transação foi com a empresa Eon, fornecedora de energia da Alemanha [58].

A Qiwi, uma operadora russa de sistemas de pagamento, lançou um projeto para rastrear transações de energia usando a tecnologia *blockchain*. O projeto está a ser desenvolvido em parceria com a Tavrida Electric, na Crimeia. Na sua essência, o projeto reside no fato de que cada negócio de fornecimento de energia será registado como uma transação na *blockchain*. Se uma empresa de energia contrata fornecimento de energia, ela é inserida como uma transação na *blockchain*, e, como resultado, o negócio será visível para outras empresas dessa área, bem como para agências reguladoras do governo [59].

A Grid+ é uma plataforma que visa dar aos consumidores acesso direto ao mercado grossista de energia, em vez de dependerem de serviços para o fazer [60].

E finalmente, em Espanha, criaram uma plataforma de negociações de energia descentralizada chamada Pylon Network [61].

4.1.8 Pesquisa

Devido ao estágio inicial do desenvolvimento da tecnologia e das aplicações energéticas, e como a tecnologia é atualmente lenta para a maioria dos casos de uso industrial, há muito investimento a ser feito para desenvolver esta tecnologia apoiado por pesquisas. A Grid Singularity [62] e o Instituto Rocky Mountain da Energy Web Foundation [63] são disso os maiores exemplos.

Em Espanha, a Endesa Energia, foi a primeira grande empresa do sector a explorar as possibilidades da *blockchain* lançando a ‘*blockchain labs*’ que consiste num desafio para angariar especialistas em *blockchain* que queiram propor ideias e soluções que transformem o futuro da energia [64].

A Engie, em França, criou o ‘*blockchain studio*’ e pretende investir 1.9 milhões de euros no desenvolvimento de produtos *blockchain* [65]. Eles querem usar a *blockchain* para otimizar o consumo e manutenção, na rastreabilidade de fluxos, como água, gás ou eletricidade, e estão a criar uma infraestrutura de sensores conectados pela *blockchain*. Esta

gere os dados dos sensores e aciona automaticamente, por exemplo, a chamada de manutenção em caso de vazamento [66].

Na China, a Wanxiang planeia investir trinta bilhões de dólares num projeto que integra a tecnologia *blockchain* com cidades inteligentes, neste caso em Hangzhou [67].

4.1.9 Outras Startups

As *startups* estão a usar a tecnologia em aplicações nunca vistas, que o mercado e a tecnologia podem proporcionar. No Reino Unido, a Electron está a trabalhar em soluções para o mercado com foco numa plataforma de registos baseada em sensores e contadores inteligentes, uma plataforma de negociação flexível e técnicas inteligentes dos sensores e contadores inteligentes [68]. Foi criada uma plataforma chamada Poseidon que serve para rastrear e negociar créditos de carbono. A ideia é criar uma plataforma que integre créditos de carbono na vida quotidiana, permitindo a responsabilização, de forma transparente, das nossas pegadas de carbono [69]. Na Rússia, a *startup* MITO quer criar um mercado financeiro global ‘verde’, que mobiliza fundos para a mitigação das mudanças climáticas [70]. A Farad pretende produzir células de ultra condensador para armazenamento de energia elétrica, cada ultra condensador será registado na *blockchain* o que garante a transparência. Cada *token* RFD representa os direitos sobre o contrato de fabricação e o acordo para produzir as células de ultra condensadores com uma produção de 1600000000mF durante um período de 36 meses, valendo cada 1FRD=1mF [71]. No geral, espera-se que as *startups* atinjam um nível de maturidade mais elevado e que evoluam em torno de modelos de negócios inovadores, proporcionados pelas oportunidades de novos serviços.

4.2 Implicações nos consumidores e utilities

Se as utilities de energia pensam que as telhas solares fotovoltaicas e as baterias são más para o negócio, a blockchain deve assustá-los ainda mais. Uma *ledger* distribuída pode ser usada para trocar eletricidade sem as *utilities* sequer saberem. Por exemplo, comprar energia ao vizinho, que possui painéis solares, para carregar um VE de forma mais barata. As *utilities* tradicionais de energia poderão perder o negócio para novos fornecedores de energia local, uma vez que estes têm uma ferramenta para gerir milhões de dados, de forma mais barata e rápida. Há algumas *utilities* que estão cientes do futuro e querem usar a *blockchain* a seu favor, mas outras ignoram, o que pode levar à perda do seu negócio [72].

Este ano, Burlington, nos Estados Unidos, será o primeiro município a usar *blockchain* para obter ativos de geração trabalhando juntos com toda a sua rede, de modo a gerir a oferta e a procura de eletricidade em tempo real. As baterias são carregadas quando há excesso de energia eólica ou solar, e as empresas diminuem automaticamente a oferta, quando os preços estão altos [73]. Existe o potencial de mudar a rede inteira, mas começa-se por pequenos serviços e por algumas micro-redes.

Concluindo, um vizinho com produção pode vender o excedente, recebendo o pagamento sem as taxas de *utilities* tradicionais. Um vizinho que não tenha produção poderá comprar energia renovável a preços competitivos, um veículo elétrico pode requerer automaticamente energia quando, por exemplo, ela está mais barata, permitindo uma poupança aos consumidores. Estes podem também escolher comprar energia a *utilities* tradicionais. Uma comunidade dentro de uma micro-rede distribui a energia e a *blockchain* liquida os pagamentos.

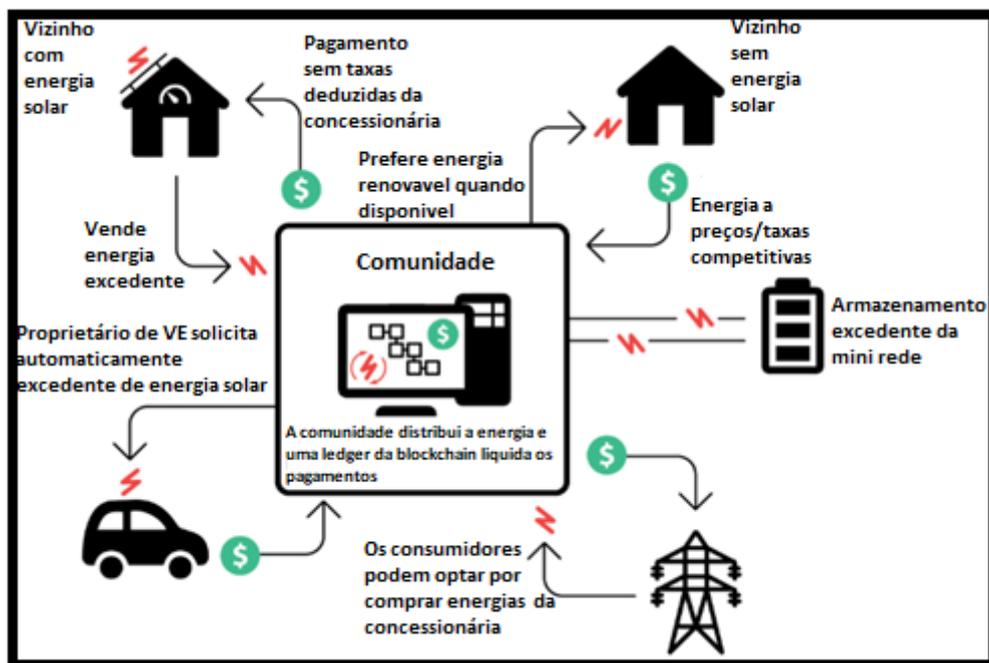


Figura 13 Exemplo de esquema de uma comunidade que utiliza a *blockchain* para liquidar pagamentos [71]

5 Estudo de casos

De modo a explorar diferentes maneiras de organizar o ecossistema de energia recorrendo à tecnologia *blockchain*, e a explorar um novo paradigma na operação da rede elétrica, sem as restrições regulatórias do sistema de energia atual, simularam-se quatro cenários num contexto de micro-rede. Cada um dos cenários é uma evolução do anterior.

Em todos os cenários criados, são discutidos diferentes casos com diferentes estruturas de mercado e participante. O cenário A pode ser descrito como o mais primitivo de todos. É uma opção para uma comunidade pequena que pretende fazer parte de uma micro-rede e comprar a sua própria energia. O cenário não necessita de mecanismos avançados, apenas se baseia em comprar e partilhar a energia que vai fluir através da sua própria estrutura de rede. Este cenário tem algumas limitações. Por exemplo, não permite um mercado interno, e por isso, não é adequado para negociar a produção individual em pequena escala ou recursos de armazenamento. Este tipo de recursos irá providenciar reservas energéticas ao mercado local e se não há mercado eles não podem negociar recursos.

A principal diferença dos outros 3 cenários é a inclusão de um mercado interno *peer-to-peer* de energia. É considerado em todos os cenários que a micro-rede tem apenas um ponto de conexão para o mercado externo. Do ponto de vista do fornecedor de energia, a micro-rede é vista como uma carga que pode precisar de energia. É assumido que a infraestrutura da micro-rede é propriedade da comunidade. O operador de transporte, o operador de distribuição, os produtores de larga escala, bem como o mercado grossista de eletricidade não são referenciados em nenhum dos cenários, uma vez que a simulação pretende focar-se no mercado retalhista de eletricidade.

A micro-rede simulada é constituída por 12 habitações, cada uma delas com produção de energia fotovoltaica. De modo a simular a potência consumida e produzida por cada um dos *prosumers* usaram-se dados disponibilizados pelo Centro de Eletromecânica da Universidade do Texas. Os dados pertencem à Pecan Street, Inc e não estão disponíveis para o uso público, são constituídos pelos valores de potência consumida e produzida ao minuto, de cada habitação. De modo a simularmos o consumo e a produção, foram usadas 12 folhas

Excel com os dados energéticos de diferentes habitações, simulando assim 12 contadores inteligentes.

Cada folha possui três variáveis que definem a produção e o consumo de cada habitação. A variável PGrid, que define a energia consumida à rede (em caso de esta variável ser negativa, significa que a habitação, naquele dado instante, está a injetar energia na rede). A variável PHouse, que define a potência necessária para alimentar cada habitação. E a variável PSolar, que define quanta energia está a ser produzida pelos painéis solares fotovoltaicos de cada casa. A relação de equilíbrio de energia entre as 3 variáveis é:

$$P_{Grid} + P_{Solar} = P_{House}$$

Foi criado um *script* que carrega os dados de consumo de cada habitação a partir de arquivos .CSV (Excel). No final, o consumo e produção de cada habitação está disponível no espaço de trabalho e é criado um gráfico com essas variáveis ao longo de 24 horas, para cada uma das habitações, que pode ser consultado na Figura 26 no Anexo C.

5.1 Micro-rede Comunitária - Cenário A

5.1.1 Descrição cenário A

De acordo com este cenário a micro-rede não inclui nenhum mercado interno e apenas tem uma conexão ao mercado externo, o que significa que, do ponto de vista do mercado externo, a micro-rede se parece como um único *prosumer*, como na Figura 14.

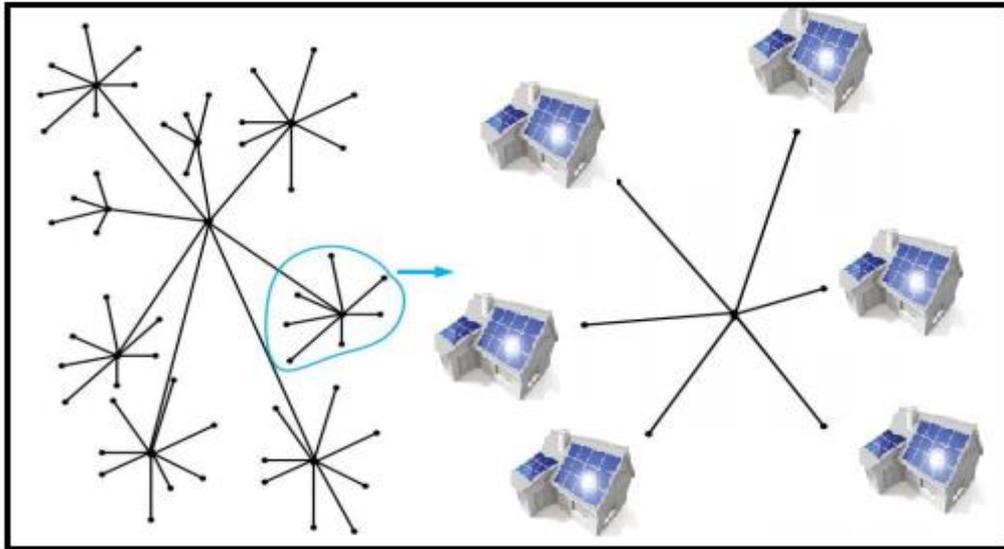


Figura 14 Estrutura de mercado elétrico do cenário A

A micro-rede utiliza um conceito de mercado conceitual. O mercado conceitual é baseado na partilha de eletricidade, a eletricidade que é comprada no mercado retalhista é partilhada pelos usuários. No fim, os custos de cada um são calculados, pela comunidade, que agrega os dados providenciados pelos contadores inteligentes.

Se a micro-rede também incluir produção de energia distribuída, que é o caso, é considerado que esses recursos estão em regime de autoconsumo e que podem vender a energia produzida e excedente para a rede.

Na Tabela 1 estão especificados todos os participantes deste cenário, as suas funções e como foram simulados.

Tabela 1 Participantes de mercado cenário A

| Nome | Tipo | Função | Como foi simulado |
|-------------------------------------------|-----------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Fornecedores de energia | Pessoas / Organização | Compra energia no mercado grossista para satisfazer as necessidades da micro-rede. Controlando e negociando no mercado externo. | Foram considerados os preços disponibilizados no site da EDP comercial |
| Operador da micro-rede (Comunidade) | Pessoas / Organização | Assegura as operações da micro-rede. Adquire eletricidade aos fornecedores para satisfazer as necessidades dos <i>prosumers</i> , emite os montantes a pagar de acordo com a informação providenciada pelos contadores inteligentes | Cálculos dos preços finais, em Matlab, depois exportados para Excel, representando as faturas. |
| <i>Prosumers</i> | Pessoas / Organização | Produzem e consomem energia / utilizadores finais | São considerados 12 <i>prosumers</i> |
| Contadores Inteligentes | Sistema / Dispositivo | Medições da produção e consumo de energia em períodos de 1 minuto | Excel |
| Portal de Acesso aos Dados Medidos (PADM) | Sistema / Dispositivo | Local que providenciar as informações sobre produção e consumo à comunidade e ao mercado exterior | Gráficos no Matlab |
| Sistema de Gerenciamento de Energia | Algoritmo | Sistema de automação usado para gerir, controlar, e otimizar o desempenho do sistema energético e a distribuição de energia na micro-rede | Matlab |
| Mercado Conceitual | Algoritmo | Fornecer ferramentas para lidar com a emissão de faturas energéticas aos participantes | Matlab e Excel |

O primeiro passo da interação entre participantes começa com a comunidade a adquirir eletricidade ao fornecedor de energia. Depois disso a energia é distribuída e partilhada pelos *prosumers*.

Neste cenário a micro-rede não pode providenciar flexibilidade ao mercado externo uma vez que não existe nenhum sistema de balanceamento. Os usuários finais consomem e produzem energia que é medida pelos contadores inteligentes.

O mercado conceitual é constituído apenas por *prosumers*. O cenário não permite haver negociação de produção em pequena escala ou armazenamento, uma vez que não há maneira de negociá-los na comunidade. Apesar disso, cada utilizador final pode produzir energia para autoconsumo e vendê-la de volta à rede, em caso de excedente. A Figura 15 ilustra as interações entre participantes, tanto monetárias como energéticas.

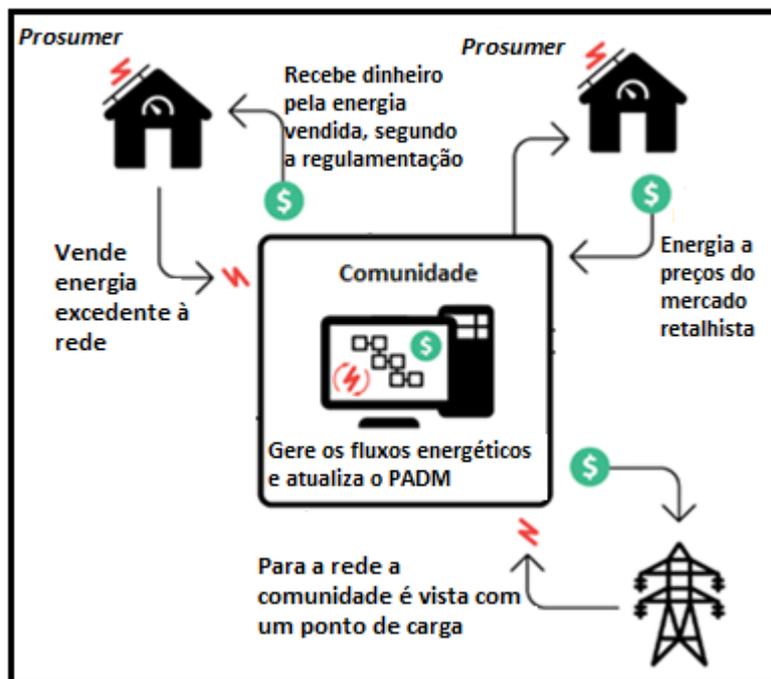


Figura 15 Interações - cenário A

5.1.2 Simulação do cenário A

O cenário A é caracterizado pela produção de eletricidade em regime de autoconsumo, isto é, usar a energia produzida para consumo próprio e, nos períodos em que a produção é maior que o consumo, originando um excedente, vender à rede.

Para o cálculo da remuneração de cada *prosumer* utilizou-se o mesmo modelo de autoconsumo português descrito no Decreto-Lei nº153/2014. Seguindo este modelo, a remuneração da energia proveniente de unidades de produção para autoconsumo (R), é igual ao produto do valor da energia elétrica fornecida à rede elétrica de serviço público pelo produtor ($E_{fornecida}$), pelo preço médio do mercado ibérico de energia (OMIE), com um desconto de 10%. A fórmula usada para o cálculo do montante a receber, para cada um dos *prosumers*, no caso de produção excedente foi:

$$R = E_{fornecida} * \text{€}_{OMIE} * 0,9$$

O preço do mercado diário, consultado no site do OMIE, na hora da escrita, é 70.45€/MWh, ou seja, 0.07045€/KWh. Para o cálculo do montante a pagar da energia consumida proveniente da rede, foi utilizado o valor cobrado pela EDP Comercial, consultado no próprio site, à tarifa horária simples e potência contratada mínima. O valor cobrado, em bruto, consultado e usado na simulação foi de 0.1595€/KWh.

Tabela 2 Preços praticados no cenário A

| | |
|--------------------------------------|---------------|
| Preço médio do mercado diário (OMIE) | 0.07045 €/KWh |
| Preço do fornecedor de energia | 0.15800 €/KWh |

5.1.3 Resultados do cenário A

Foi feita uma simulação dos montantes a pagar, ao minuto, por casa *prosumer*, bem como do valor a receber, ou a abater na conta, ao longo de um dia, a cada uma das habitações. Os resultados são os apresentados na Figura 30 no Anexo D.

É assumido que as relações entre os utilizadores finais e os fornecedores é a mesma dos dias de hoje, ou seja, neste cenário, os fornecedores de energia cobrariam mensalmente o valor acumulado de todos os dias do mês, e o montante acumulado a receber pela injeção de energia na rede seria deduzido nessa mesma fatura.

O custo total, feita a devida dedução de valores a pagar e a receber, nesse dia, de todos os utilizadores, foi aproximadamente 74€. O custo individual diário, ou fatura, de cada *prosumer* pode ser consultado na Tabela 3.

Tabela 3 Fatura diária de cada *prosumer*

| | |
|--------------------|---------|
| <i>Prosumer 01</i> | 9.80 € |
| <i>Prosumer 02</i> | 5.89 € |
| <i>Prosumer 03</i> | 5.66 € |
| <i>Prosumer 04</i> | 6.07 € |
| <i>Prosumer 05</i> | 3.99 € |
| <i>Prosumer 06</i> | 1.62 € |
| <i>Prosumer 07</i> | 0.67 € |
| <i>Prosumer 08</i> | 6.36€ |
| <i>Prosumer 09</i> | 4.90 € |
| <i>Prosumer 10</i> | 9.69 € |
| <i>Prosumer 11</i> | 9.69 € |
| <i>Prosumer 12</i> | 9.69€ |
| Total | 74.07 € |

5.2 Micro-rede com mercado interno - Cenário B

5.2.1 Descrição do cenário B

O cenário B, similarmente ao cenário A, é constituído por 12 *prosumers*. É também baseado numa micro-rede em que a estrutura é possuída pela comunidade, e tem apenas um ponto de conexão com o mercado exterior. Conformemente, é preciso haver um operador da micro-rede, chamado comunidade, neste cenário também. A característica mais importante que varia neste modelo é que o cenário B permite um mercado interno. É diferente do cenário, pois os utilizadores finais têm conexões entre eles. Esta característica é igual para todos os cenários seguintes.

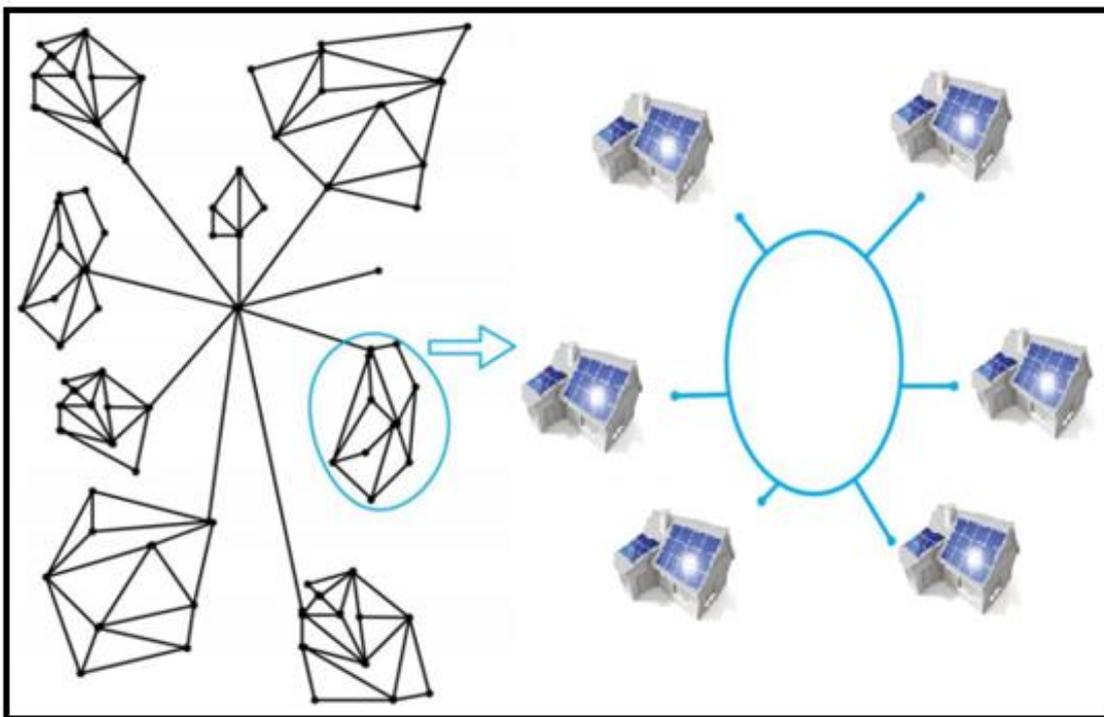


Figura 16 Estrutura de mercado elétrico do cenário B C e D

Na Tabela 4 estão especificados todos os participantes adicionais do cenário B, as suas funções e como foram simulados

Tabela 4 Participante cenário B

| Nome | Tipo | Função | Como foi simulado |
|-------------------------------------------|----------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Sistema de Balanceamento de Energia (SBE) | Algoritmo | Fornece ferramentas para lidar com a emissão de faturas, a liquidar, de energia usada entre <i>prosumers</i> . | Matlab e Excel |
| Mercado interno | Sistema / Plataforma | Através desta plataforma, qualquer <i>prosumer</i> pode negociar energia no mercado interno | Foi considerado um preço fixo acordado ao minuto, igual, para todos os participantes, registado em Excel. |

É utilizada uma estrutura conectada que permite aos utilizadores finais comprar e vender energia entre eles. É assumido que a comunidade compra energia no mercado retalhista e providencia-a ao mercado interno que é controlado pela própria comunidade. Cada utilizador na micro-rede pode usar a plataforma de mercado e comprar e vender energia.

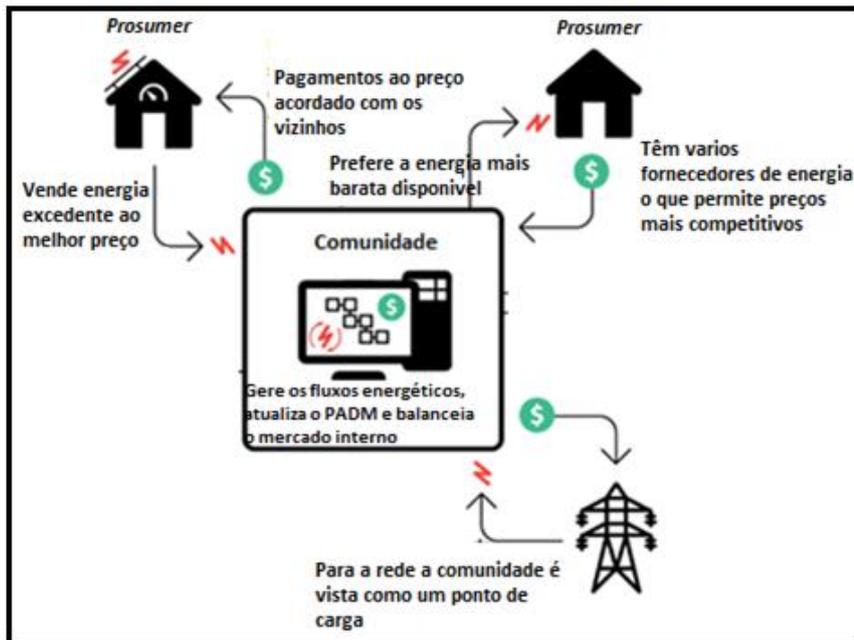


Figura 17 Interações - cenário B

5.2.2 Simulação do cenário B

Através desta estrutura, os *prosumers* têm a opção de vender a energia excedente aos seus vizinhos, enquanto no cenário A só podiam vender de volta à rede. Similarmente ao cenário A, os contadores inteligentes medem quanta energia é injetada ou consumida da rede, com a informação do tempo de ocorrência, e providencia essa informação à comunidade. A comunidade usa a informação providenciada pelos contadores inteligentes, não só para faturação, mas também para balancear o mercado interno.

É considerado, que em consenso, os participantes do mercado interno decidiram o preço da energia, que pode variar de minuto em minuto. Esses preços são representados por uma folha Excel, com os preços em euros do KWh em cada minuto do dia.

A comunidade faz o cálculo de quanta energia é fornecida a cada habitação e por quem, se pela rede, por vizinhos, ou pelos dois. No final do dia, a comunidade trata da faturação, cobrando a cada habitação o montante a pagar, em euros, que deverá ser liquidada pelo utilizador ao fornecedor de energia (a comunidade apenas tem o papel da gestão do sistema), e, no caso de essa energia ser fornecida por vizinhos, a comunidade, calcula qual o montante a pagar a cada um dos vizinhos, tendo em conta os valores acordados, entre vizinhos, minuto a minuto.

Para que seja possível esta operação, a comunidade da micro-rede vai ser a responsável por registar as transações, e pelo cálculo da otimização dos fluxos energéticos. Nesta opção, ainda há períodos em que a produção geral de energia solar é maior que o consumo, e, por isso, ainda é necessário vender certa percentagem da energia produzida à rede.

O preço a que cada *prosumer* vende a sua energia é superior ao preço pago regulamentarmente e inferior ao cobrado pelo fornecedor, estes preços podem ser variáveis ao minuto, mas, de modo a simplificar, foi assumido o mesmo preço ao longo de todo o dia, 0.14 €/KWh. Na Tabela 5 podem ser consultados os preços praticados neste cenário.

Tabela 5 Preços praticados no Cenário B

| | |
|----------------------------------------|---------------|
| Preço médio do mercado diário (OMIE) | 0.07045 €/KWh |
| Preço do fornecedor de energia | 0.15800 €/KWh |
| Preço praticado entre <i>prosumers</i> | 0.14000 €/KWh |

O balanceamento do mercado interno é a gestão das trocas de energia, e é um algoritmo da comunidade que faz isso, em vez de serem os *prosumers* a terem esse trabalho.

Negociando deste modo, os utilizadores finais não têm de fazer nada para negociarem energia com os vizinhos. A comunidade usa autonomamente a energia excedente para suprir o consumo dos vizinhos, distribuindo esse excedente por eles.

A comunidade está constantemente a balancear a micro-rede, isto é, o total de energia consumida pela comunidade tem de ser igual à energia injetada pelos *prosumers* mais a energia fornecida pelo fornecedor. Os calculos são feitos de maneira a que o balanço seja igual a zero em todos os periodos.

$$E_{consumida\ pela\ comunidade} = E_{excedente\ total} + E_{fornecedor}$$

Por exemplo, imaginemos que são apenas 3 habitações, e que a habitação 1 está a injetar energia na rede e, conseqüentemente, a variavel PGrid é igual a -3KWh. A habitação 2 está a consumir da rede 4KWh e a habitação 3 esta a consumir 2KWh. O consumo total da comunidade é 6KWh. De modo a balancer o sistema, a comunidade terá de pedir 3KWh ao

fornecedor de energia. Neste caso para além dos consumidores 2 e 3 terem de pagar energia ao consumidor 1 também têm de pagar ao fornecedor.

$$E_{consumida\ total} = E_{excedente\ (1\rightarrow 2)} + E_{fornecida}$$

Assumiu-se que a comunidade estabeleceu que a quantidade de energia fornecida por um *prosumer* a outro é proporcional ao consumo do último na comunidade. Ou seja, a energia total do sistema, no exemplo, é 6KWh dos quais 4KWh são consumidos pela habitação 2. A proporção do seu consumo em relação ao da comunidade é portanto 4/6.

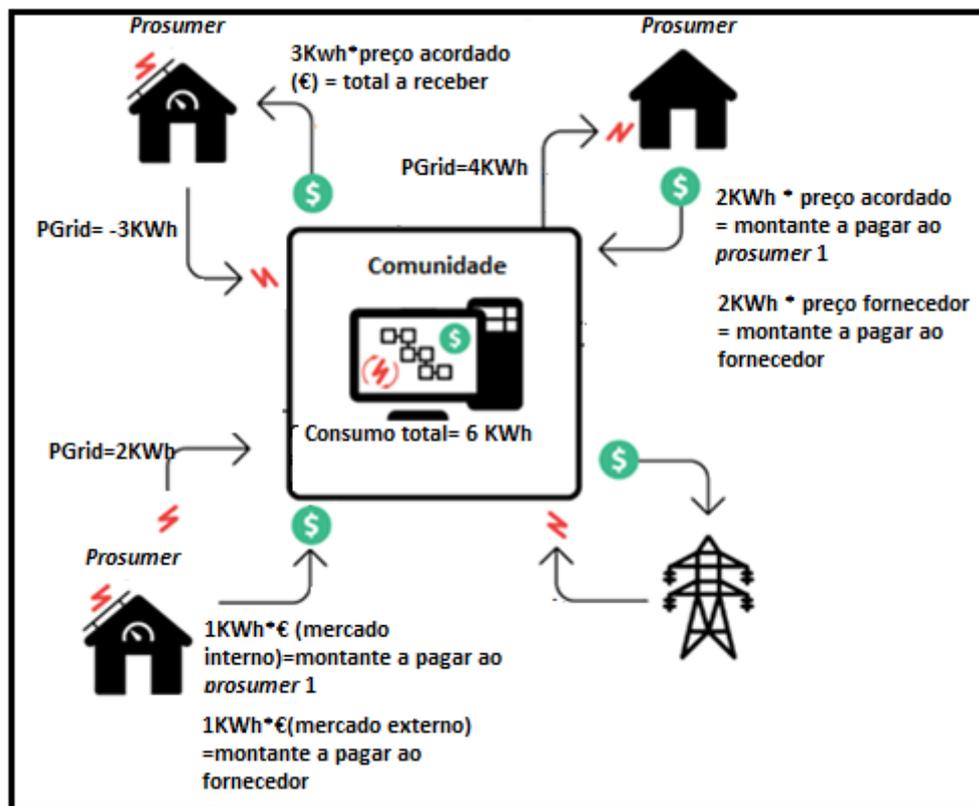


Figura 6 Exemplo no cenário B

Desse valor, 3KWh são excedentes da habitação 1. O *prosumer* 2 tem o direito ao produto de energia excedente do *prosumer* 1 pela proporção do consumo em relação à comunidade.

$$E_{excedente\ (1\rightarrow 2)} = E_{excedente\ (1)} * Porporção_{(comunidade\rightarrow 2)}$$

O montante devido, é portanto, igual ao produto de 2KWh pelo preço do KWh (€/KWh) definido naquele período.

A característica mais importante deste cenário é que permite um mercado interno e trocas de energia P2P. A comunidade tem a capacidade de informar os participantes das dívidas de cada um, cabendo aos *prosumers* liquidar as suas dívidas para com os outros participantes.

5.2.3 Resultados do cenário B

Podemos observar, ao comparar os gráficos da Figura 31 do anexo D com os gráficos do cenário anterior, o aumento das receitas de cada *prosumer*, bem como um decréscimo dos montantes a pagar, neste caso tanto ao fornecedor, como aos vizinhos, especialmente nas horas em que há produção de energia solar, por volta do meio-dia.

O montante que cada *prosumer* tem de pagar ao fornecedor de energia bem como a cada um dos vizinhos (outros *prosumers*), no final das 24 horas, está representado na Tabela 18 do anexo F.

O custo total, feita a devida dedução de valores a pagar e a receber, nesse dia, de todos os utilizadores, foi aproximadamente 69,76€. O custo individual diário, ou fatura, de cada *prosumer* pode ser consultado na Tabela 5.

Tabela 5 Fatura diária de cada *prosumer*

| | |
|--------------------|---------|
| <i>Prosumer 1</i> | 8.20 € |
| <i>Prosumer 2</i> | 5.82 € |
| <i>Prosumer 3</i> | 5.73 € |
| <i>Prosumer 4</i> | 5.97 € |
| <i>Prosumer 5</i> | 3.82 € |
| <i>Prosumer 6</i> | 2.26 € |
| <i>Prosumer 7</i> | 1.18 € |
| <i>Prosumer 8</i> | 6.16 € |
| <i>Prosumer 9</i> | 4.28 € |
| <i>Prosumer 0</i> | 8.78 € |
| <i>Prosumer 11</i> | 8.78 € |
| <i>Prosumer 12</i> | 8.78 € |
| Total | 69.76 € |

Em comparação com o cenário anterior, a comunidade tem uma poupança na fatura energética para com o fornecedor de aproximadamente 5,7%.

A relação entre fornecedor e *prosumer* é a mesma que no cenário A, no entanto, os *prosumers*, neste cenário, têm, também, de liquidar as dívidas aos seus vizinhos. Uma solução para isto seria o operador da micro-rede verificar cada um dos pagamentos, mas, para isso, os *prosumers* teriam de provar cada um dos pagamentos liquidados. Bem como ter meios de pagar aos outros *prosumers*. Uma vez que muito destes pagamentos são na ordem dos centavos, este cenário torna-se inviável. De modo a facilitar este processo o cenário C foi criado.

5.3 Micro-rede com mercado interno e transações P2P - Cenário C

5.3.1 Descrição do cenário C

O cenário C é semelhante ao anterior com uma única diferença, a inclusão de um sistema de transações P2P de pagamentos.

Tabela 7 Participante adicionais cenário C

| Nome | | Função | Como foi simulado |
|--------------------------------------------------------|----------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| Sistema de pagamentos usando uma <i>blockchain</i> P2P | Sistema / Plataforma | Através deste sistema, usa-se uma <i>blockchain</i> para liquidar e registar os pagamentos. | Plataforma Ethereum |
| <i>Wallet</i> dos <i>prosumers</i> | Sistema / Plataforma | Conta associada a um endereço diferente para todos os <i>prosumers</i> , de modo a cada um gerir os seus fundos (criptomoedas) | Ethereum <i>Wallet</i> Transferências feitas manualmente na <i>Wallet</i> Ethereum |

É utilizada uma estrutura conectada que permite aos utilizadores finais comprar e vender energia entre eles. É assumido que a comunidade compra energia no mercado retalhista e fornece-a ao mercado interno que é controlado pela própria comunidade, similarmemente ao cenário B. A diferença principal deste cenário é que cada *prosumer* na micro-rede usa a plataforma de mercado para comprar e vender energia recorrendo a criptomoedas.

Neste cenário foi criado um *token* com o intuito de ser a moeda de troca entre *prosumers* para adquirir e vender energia no mercado interno. No início deste processo cada *prosumer* é remunerado com 100 EnergyTokens (ET), pela sua participação no mercado e para poder começar a negociar energia.

Para participar neste mercado, cada *prosumer*, têm um endereço específico, que representa a sua *wallet*, que serve para transferir e receber *tokens*.

Tabela 8 Endereços de cada *prosumer*

| | |
|--------------------|--------------------------------------------|
| <i>Prosumer 1</i> | 0x08E7B37967d083Bf53EFaf936b667874421C59A2 |
| <i>Prosumer 2</i> | 0xaa321A017D9665ef4dD03eE81C5d568a8d366e03 |
| <i>Prosumer 3</i> | 0x9397CCC1822FF93773766e9c9a3BdABbe54f5a0B |
| <i>Prosumer 4</i> | 0x30299d06Bed7847052e2c73dA995c1e581be8096 |
| <i>Prosumer 5</i> | 0x7c55E0225a122CB9bdFa64dD08D230BD3E604D81 |
| <i>Prosumer 6</i> | 0x33b32A1B6b4c801A3417DAC71c2aD9eA91D61D2b |
| <i>Prosumer 7</i> | 0x8Fe66475e01B860E5961c6C4C4c0E9A8a85044B6 |
| <i>Prosumer 8</i> | 0x8f7f784a663E3D620C713E551DA4A210a06E5cBb |
| <i>Prosumer 9</i> | 0x59347802CCA27BdC352a55F29e3f4764edf55F21 |
| <i>Prosumer 10</i> | 0xA700a520430bC6F4247A37cD3B58975aBCDc8d62 |
| <i>Prosumer 11</i> | 0xBd8c10E585F03E130dcf4fc1339a851Aa52316B3 |
| <i>Prosumer 12</i> | 0x6f03272af7cB0C8cE2AD582A0038b4e6D6240f51 |

5.3.2 Simulação do cenário C

De modo a implementar transações P2P entre os *prosumers* da micro-rede, implementou-se a interface do ERC20¹⁰, isto é, criou-se o nosso próprio *token* e lançou-se este na rede de teste da Ethereum (Rinkeby Testnet). O site Etherscan reconhece a nossa criptomoeda. Neste site, podemos seguir a nossa criptomoeda, dando-nos uma visão geral de como a criação de criptomoedas funciona.

Usou-se uma aplicação de *software*, chamada Remix¹¹ para codificar contratos inteligentes. Esta aplicação pode implantar contratos na rede Ethereum, no entanto, para isso, é necessário instalar no *browser* usado a extensão Metamask¹², uma vez que é necessária uma conta associada para criar um contrato.

Ao usar-se a interface ERC20 tem-se o benefício de que ela é extremamente popular, muitas pessoas já implementaram o protocolo, não é um protocolo difícil, e por isso, pode-se executá-lo facilmente, sem ter de se construir tudo do zero.

Com o objetivo de efetuar esta implementação foi-se ao site GitHub e usou-se o seu repositório de *tokens* para copiar os contratos EIP20 e EIP20interface. Usou-se a estrutura do código EIP20 e renomeou-se as funções e outras variáveis para, na aplicação Remix, criar um contrato simbólico chamado EnergyToken, representado pelo endereço “0x1bee5dec96266d64af8c02c4431ea1c6cb943f07”.

Este contrato, o EIP20, que é o primeiro a ser executado, importa outro contrato o EIP20interface. Este, basicamente, define a interface que o nosso *token* irá implementar, ou seja, é aqui que se define as funcionalidades do *token*, delineada nessa interface.

¹⁰ Protocolo que descreve as funções e eventos que um contrato inteligente deve usar, na *blockchain* Ethereum, para implementar *tokens*.

¹¹ Software que permite escrever contratos inteligentes e depois, implantar e executar o contrato. Pode-se executar o Remix a partir de um *browser*, que foi o nosso caso, ou instalando e executando localmente no computador.

¹² É um plugin de *browser* que permite aos usuários fazer transações Ethereum através de sites comuns.

Definiram-se quatro características. Primeiro, o montante inicial de *token* criados. Neste caso, igual ao montante total de *tokens* existentes. Foram criados 1200 *tokens*, entregues ao criador do contrato. Em segundo, o nome do *token*, EnergyToken. Em terceiro, definimos que o EnergyToken tem 5 unidades decimais. E, finalmente, que o seu símbolo é ET.

Aquando da especificação das 4 entradas, clicou-se em criar, e então, apareceu o *pop-up* do Metamask, devido a ser necessário gastar um pouco de Ether para implementar o contrato inteligente na rede de teste, bem como, uma conta associada ao criador do mesmo.

Neste momento o contrato foi criado, e todo o saldo de *tokens* criado (1200ET), estão na conta associada ao Metamask. Iremos nos referir a esta conta, como a conta da comunidade, com o endereço: “0x1A2F783b954FB278a9ADA3CbD982F179EC2832EC”. A Figura 18 é o resultado da busca do mesmo no site EtherScan, após a criação do mesmo.

Agora que o *token* foi criado, a conta da comunidade enviou 100ET para cada *prosumer*. Para isso usou-se a aplicação da *wallet* da Ethereum, para criar 12 novos endereços que representam a conta de cada um dos *prosumers*.

Cada um desses endereços foi usado para inserir 12 transações na rede. Após inserir o endereço e também quantos *tokens* a serem transferidos, as transações ficaram pendentes, e esperou-se que as transações fossem mineradas e colocadas em blocos, o que significa que estas transações foram depois concluídas.

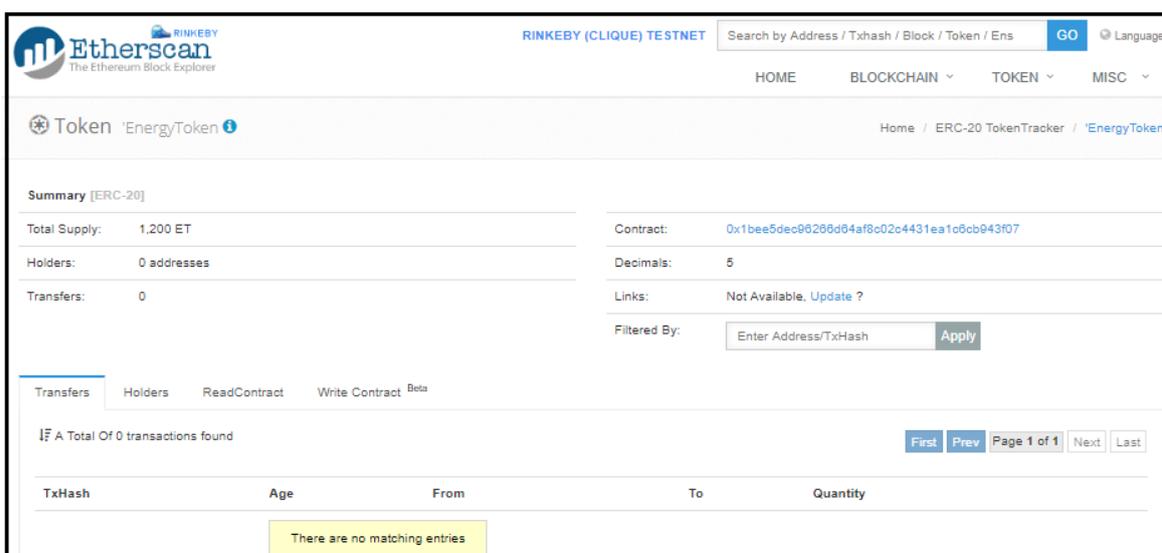


Figura 18 Busca pelo endereço do contrato criado (Anexo J)

| TxHash | Age | From | To | Quantity |
|----------------------|-------------|----------------------|----------------------|----------|
| 0x91ec55792aa8b6... | 18 secs ago | 0x1a2f783b954fb27... | 0xaa321a017d9665... | 100 |
| 0xd06473739e80c7... | 33 secs ago | 0x1a2f783b954fb27... | 0x9397ccc1822f93... | 100 |
| 0x7ac1d47dod2fc2e... | 33 secs ago | 0x1a2f783b954fb27... | 0x30299d08bed784... | 100 |
| 0xe349f53dboda8a5... | 48 secs ago | 0x1a2f783b954fb27... | 0x7c55e0225a122c... | 100 |
| 0x2b20e7e3de7136... | 48 secs ago | 0x1a2f783b954fb27... | 0x33b32a1b8b4c80... | 100 |
| 0xa5331f20c854e50... | 48 secs ago | 0x1a2f783b954fb27... | 0x8fe6475e01b890... | 100 |
| 0xb1a91c082cdfa99... | 1 min ago | 0x1a2f783b954fb27... | 0x877784a863e3d6... | 100 |
| 0x3c474c35e0da28... | 1 min ago | 0x1a2f783b954fb27... | 0x59347802cca27b... | 100 |
| 0xeebc5f954a074d... | 1 min ago | 0x1a2f783b954fb27... | 0xa700a520430bc8f... | 100 |
| 0x8540ec7e2fc8e5... | 1 min ago | 0x1a2f783b954fb27... | 0xbd8c10e585f03e1... | 100 |
| 0x2d0b380ba9136b... | 1 min ago | 0x1a2f783b954fb27... | 0x6f03272af7cb0c8... | 100 |
| 0x77efcd3a80b51ae... | 5 mins ago | 0x1a2f783b954fb27... | 0x08e7b37967d083... | 100 |

Figura 19 Primeiras transações (Anexo L)

Após as transações serem inseridas na rede, pôde-se verificar o saldo dessas contas no Etherscan, procurando-se pelo endereço do contrato, como na Figura 19. Pode-se confirmar os 12 eventos, bem como, o dia e hora a que aconteceram e qual o montante envolvido na transação.

Finalizado este passo, cada *prosumer* teve direito a 100ET depositados nas suas próprias *wallets*, como na Figura 20, que serviriam para comprar e vender energia aos seus vizinhos

De modo similar ao cenário B, assumiu-se que os preços a pagar por cada KWh consumido foram definidos pela comunidade, podendo variar de minuto em minuto. Por simplificação, assumiu-se que o preço de 1KWh consumido é igual a 1 EnergyToken.

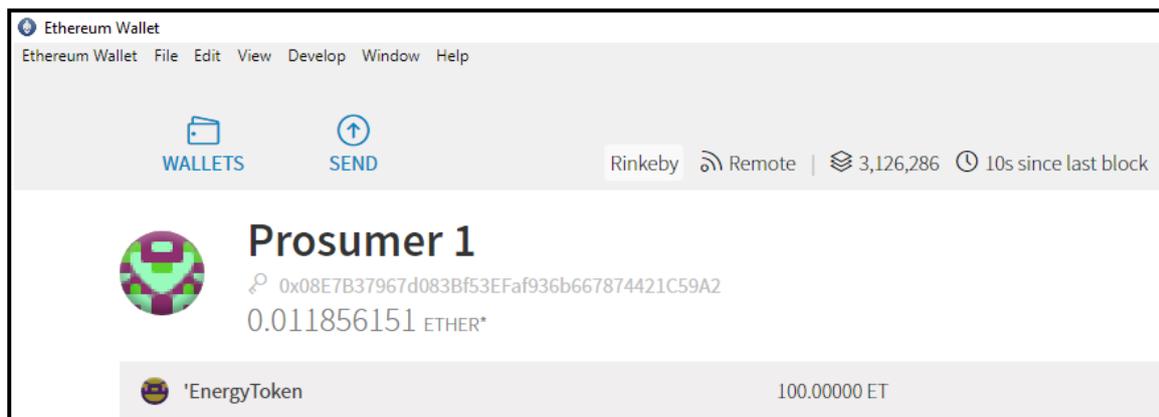


Figura 20 Wallet do *prosumer 1*

A Tabela 9 representa os preços praticados neste cenário.

Tabela 9 Preços praticados no Cenário B

| | |
|----------------------------------------|----------------|
| Preço médio do mercado diário (OMIE) | 0.07045 €/KWh |
| Preço do fornecedor de energia | 0.15800 €/KWh |
| Preço praticado entre <i>prosumers</i> | 1.00000 ET/KWh |

5.3.3 Resultados do cenário C

Neste cenário, em termos de montantes a pagar e os seus respetivos gráficos ao minuto, têm de ser analisados do ponto de vista de montantes em euros, bem como, montantes em criptomoedas.

5.3.3.1 Pagamentos em Euros

Do primeiro ponto de vista, podemos observar, ao comparar os gráficos da Figura 33 do Anexo D com os gráficos do cenário anterior, a diminuição dos montantes em dívida em euros uma vez que apenas é usado este sistema para pagar ao fornecedor de energia, especialmente nas horas em que há produção de energia solar, por volta do meio-dia, bem como, um decréscimo do montante a receber, em euros, uma vez que parte da energia é vendida em criptomoedas.

O montante a receber, apesar de reduzir bastante, não é zero, uma vez que há períodos em que a comunidade ainda tem de vender energia à rede, por não ter forma de armazenar essa energia. O valor que cada *prosumer* tem de pagar ao fornecedor de energia (deduzidos os respetivos valores a receber), no final das 24 horas, está representado na Tabela 10.

A relação entre fornecedor e *prosumer* é a mesma que no cenário A e B. O resultado do total de montantes a liquidar de todos os *prosumers* ao fornecedor de energia é, para 24 horas, 69.76€. Ou seja, igual ao cenário B.

Tabela 10 Fatura diária de cada *prosumer* para com o fornecedor de energia (cenário C)

| | |
|--------------------|---------|
| <i>Prosumer 1</i> | 8.20 € |
| <i>Prosumer 2</i> | 5.82 € |
| <i>Prosumer 3</i> | 5.73 € |
| <i>Prosumer 4</i> | 5.97 € |
| <i>Prosumer 5</i> | 3.82 € |
| <i>Prosumer 6</i> | 2.26 € |
| <i>Prosumer 7</i> | 1.18 € |
| <i>Prosumer 8</i> | 6.16 € |
| <i>Prosumer 9</i> | 4.28 € |
| <i>Prosumer 0</i> | 8.78 € |
| <i>Prosumer 11</i> | 8.78 € |
| <i>Prosumer 12</i> | 8.78 € |
| Total | 69.76 € |

5.3.3.2 Pagamentos em criptomoedas

Neste cenário, as trocas de energia entre vizinhos são liquidadas com pagamentos P2P entre *wallets* Ethereum. Os montantes a receber e a pagar de cada um dos *prosumers*, ao minuto, são representados na Figura 35, no Anexo E.

Os montantes totais, resultantes da soma de todos os valores pagos e recebidos, de cada um dos *prosumers*, pode ser consultado na Tabela 11.

Tabela 11 Montantes totais de ET gastos (positivo) ou ganhos (negativos) em 24 horas

| | |
|--------------------|-------------|
| <i>Prosumer 01</i> | 9.61371 ET |
| <i>Prosumer 02</i> | -3.62141 ET |
| <i>Prosumer 03</i> | -2.12838 ET |
| <i>Prosumer 04</i> | -2.06316 ET |
| <i>Prosumer 05</i> | -1.15752 ET |
| <i>Prosumer 06</i> | -10.4035 ET |
| <i>Prosumer 07</i> | -7.99455 ET |
| <i>Prosumer 08</i> | -1.79071 ET |
| <i>Prosumer 09</i> | 2.96194 ET |
| <i>Prosumer 10</i> | 5.52787 ET |
| <i>Prosumer 11</i> | 5.52787 ET |
| <i>Prosumer 12</i> | 5.52787 ET |

O meio de pagamento dos *prosumers* é, como já descrito, feito através de uma *wallet* individual. Deste modo cada *prosumer* submeteu transações na rede *blockchain* da Ethereum, através das suas *wallets*. Um exemplo de como se submete manualmente uma transação está representado na Figura 21.

The screenshot shows a transaction confirmation screen. At the top, it displays 'FROM: Prosumer 1 - 0.01 ETHER' and 'TO: 0xaa321A017D9665eHdD03eE81C5d568e8d366e03'. The 'AMOUNT' section shows '1.59437' with a 'Send everything' checkbox. Below this, it states 'You want to send 1.59437 ET of EnergyToken'. The 'SELECT FEE' section shows a slider set to '0.0000363 ETHER' between 'CHEAPER' and 'FASTER' options. A note indicates: 'This is the most amount of money that might be used to process this transaction. Your transaction will be mined probably within 30 seconds.' The 'TOTAL' section shows '1.59437 ET' and 'Estimated fee: 0.0000363 ETHER'. A blue 'SEND' button is at the bottom.

Figura 21 Exemplo de transação manual entre *prosumer 1* e *prosumer 2* (Anexo M)

Após indicar o endereço para o qual se quer enviar os EnergyTokens e de se especificar o respetivo montante, aparece uma janela, como na Figura 22, com todas as especificações do contrato (transação) a realizar e é requerido que o *prosumer* submeta a palavra-chave associada à sua *wallet* individual.

Para que a transação possa ser minerada, e consequentemente, concluída, submetida e registada na *blockchain* é necessário pagar uma taxa associada a essa transação em Ether. No entanto, essa taxa é muito pequena, na ordem dos 0.00001 Ether, e por isso não foi considerada.

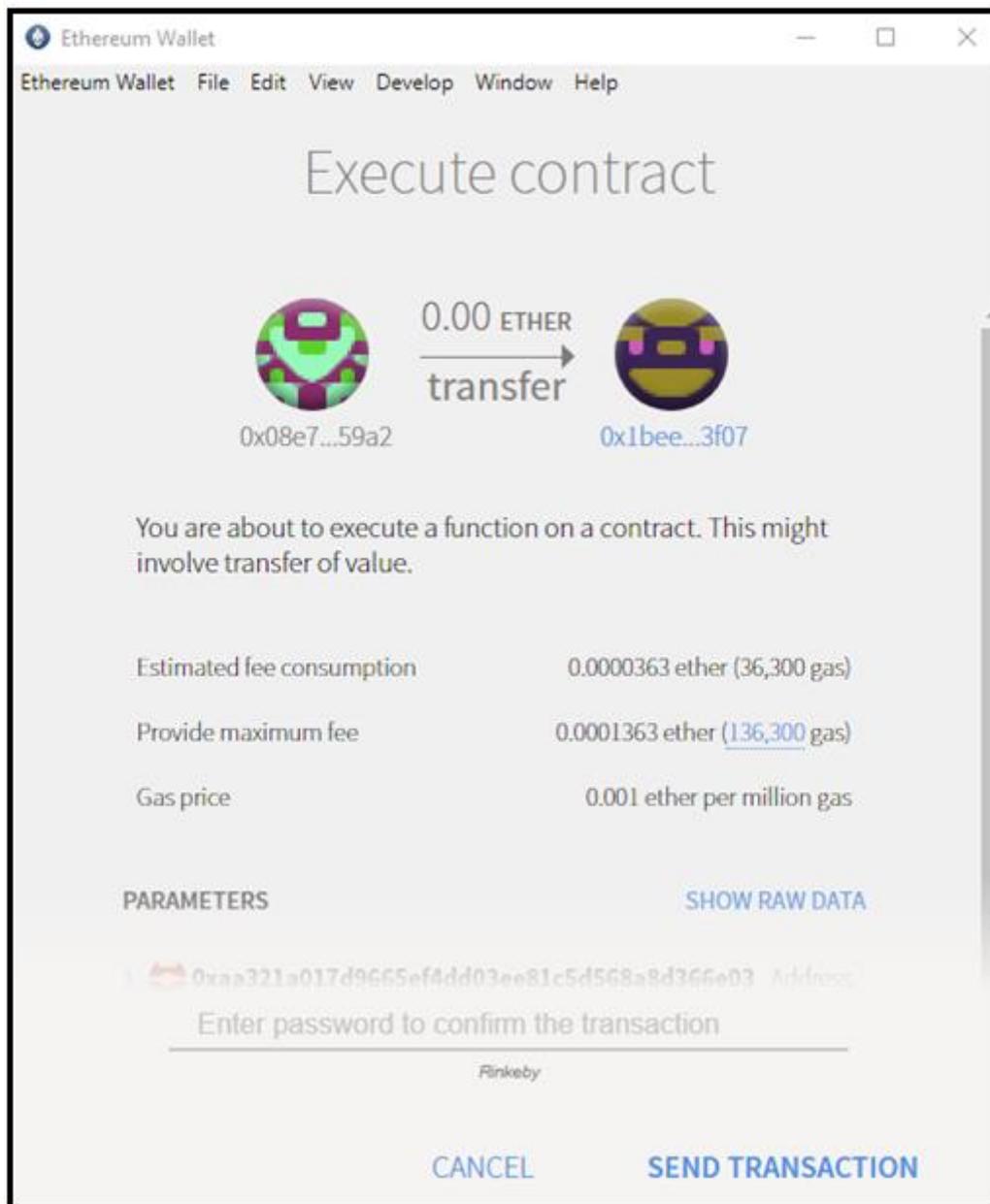


Figura 22 Especificações da transação a submeter na rede *blockchain* Ethereum

Após todas as transações terem sido submetidas na rede, estas podem ser consultadas no EtherScan, como na Figura 23. Ao pesquisarmos, no próprio site, pelo endereço individual de cada *prosumer*, podemos consultar todas as transações recebidas e enviadas. E por isso, a comunidade, neste cenário, poderia controlar facilmente os atrasos de pagamentos, as faltas de pagamentos, etc., e tomar medidas em conformidade, uma vez que as transações são facilmente rastreáveis.

| TxHash | Age | From | | To | Quantity |
|----------------------|--------------------|----------------------|-----|----------------------|----------|
| 0xb0dc5882577643... | 8 mins ago | 0x08e7b37967d083... | OUT | 0x6f03272af7cb0c8... | 0.18498 |
| 0xae48837105bade... | 12 mins ago | 0x08e7b37967d083... | OUT | 0xbd8c10e585f03e1... | 0.18498 |
| 0x9011eca52d5ab1... | 17 mins ago | 0x08e7b37967d083... | OUT | 0xa700a520430bc6f... | 0.18498 |
| 0x1aad17b85d001d... | 22 mins ago | 0x08e7b37967d083... | OUT | 0x59347802cca27b... | 0.53697 |
| 0x0988bddd78acad... | 26 mins ago | 0x08e7b37967d083... | OUT | 0x8f7784a663e3d6... | 0.85639 |
| 0x70a61a163e0843... | 30 mins ago | 0x08e7b37967d083... | OUT | 0x8fe66475e01b80... | 1.84428 |
| 0x881619e35d0583... | 34 mins ago | 0x08e7b37967d083... | OUT | 0x33b32a1b6b4c80... | 2.54112 |
| 0x45b9b85405beaf... | 39 mins ago | 0x08e7b37967d083... | OUT | 0x7c55e0225a122c... | 1.00609 |
| 0x8c807d5abf0... | 44 mins ago | 0x08e7b37967d083... | OUT | 0x30299d06bed784... | 1.02138 |
| 0xcc8be5df35b910b... | 52 mins ago | 0x08e7b37967d083... | OUT | 0x9397ccc1822f93... | 0.52932 |
| 0xdded80ac795005... | 1 hr ago | 0x08e7b37967d083... | OUT | 0xaa321a017d9665... | 1.59437 |
| 0x0e57eae84f631b... | 1 hr 6 mins ago | 0x6f03272af7cb0c8... | IN | 0x08e7b37967d083... | 0.16609 |
| 0x7701385b1b0a53... | 1 hr 7 mins ago | 0xbd8c10e585f03e1... | IN | 0x08e7b37967d083... | 0.16609 |
| 0xa1415d384dace0... | 1 hr 7 mins ago | 0xa700a520430bc6f... | IN | 0x08e7b37967d083... | 0.16609 |
| 0x4cbcfab1ac9f3d5... | 1 hr 8 mins ago | 0x59347802cca27b... | IN | 0x08e7b37967d083... | 0.18676 |
| 0x068f526cb431884... | 1 hr 9 mins ago | 0x8f7784a663e3d6... | IN | 0x08e7b37967d083... | 0.02927 |
| 0x1b6f63b1f2287a8... | 1 hr 10 mins ago | 0x33b32a1b6b4c80... | IN | 0x08e7b37967d083... | 0.00739 |
| 0x67b8ade97e93e1... | 1 hr 11 mins ago | 0x7c55e0225a122c... | IN | 0x08e7b37967d083... | 0.09399 |
| 0xca5242fb0292a1b... | 1 hr 12 mins ago | 0x30299d06bed784... | IN | 0x08e7b37967d083... | 0.03911 |
| 0x406e68ad70dc33... | 1 hr 12 mins ago | 0x9397ccc1822f93... | IN | 0x08e7b37967d083... | 0.01361 |
| 0x0071cfae802661d... | 1 hr 13 mins ago | 0xaa321a017d9665... | IN | 0x08e7b37967d083... | 0.00275 |
| 0x77efcd3a80b51ae... | 19 hrs 33 mins ago | 0x1a2f783b854fb27... | IN | 0x08e7b37967d083... | 100 |

Figura 23 Transações associadas ao endereço de *wallet* do *prosumer 1* (Anexo N)

Cada transação tem cinco características. Primeiro, cada transação tem um *hash* associado, que representa o bloco onde essa transação está guardada. Mais informações, como por exemplo, o tamanho do bloco ou os dados de entrada criptografados, podem ser consultados ao pesquisar pelo *hash* associado à transação ou, apenas, clicando na hiperligação na página representada na Figura 23.

Em segundo lugar, a data e hora da submissão da transação na rede. Em terceiro o endereço associado à *wallet* de quem enviou, bem como, em quarto lugar, para quem foi enviado o valor. E, finalmente, o montante associado.

Os montantes totais pagos ou recebidos, em EnergyTokens, podem ser representados pela variação das suas *wallets* no final do dia. A variação de todas as *wallets* estão representadas na Tabela 12.

Tabela 12 Balanço de cada Wallet no início e final do dia.

| | Balanço da <i>wallet</i> no início do dia (ET) | Balanço da <i>wallet</i> no final do dia (ET) |
|--------------------|------------------------------------------------|-----------------------------------------------|
| <i>Prosumer 1</i> | 100 | 90.38629 |
| <i>Prosumer 2</i> | 100 | 103.62141 |
| <i>Prosumer 3</i> | 100 | 102.12838 |
| <i>Prosumer 4</i> | 100 | 102.06316 |
| <i>Prosumer 5</i> | 100 | 101.15752 |
| <i>Prosumer 6</i> | 100 | 110.40353 |
| <i>Prosumer 7</i> | 100 | 107.99454 |
| <i>Prosumer 8</i> | 100 | 101.79071 |
| <i>Prosumer 9</i> | 100 | 97.03806 |
| <i>Prosumer 10</i> | 100 | 94.47213 |
| <i>Prosumer 11</i> | 100 | 94.47213 |
| <i>Prosumer 12</i> | 100 | 94.47213 |

Pegando no exemplo do *prosumer 1*, a sua *wallet* parece-se agora com a Figura 24.



Figura 24 Interface da *wallet* do *prosumer 1*, no final do dia

Usando este método, os *prosumers* têm um meio de fazer pagamentos aos seus vizinhos, mesmo que sejam micro pagamentos.

Os montantes envolvidos foram calculados para o final do dia, porque cada transação foi submetida manualmente em cada *wallet*. No caso de implementação de um sistema que automaticamente submete as transações aquando do consumo de eletricidade, as transações poderiam ser liquidadas ao minuto, em tempo real. Poderiam ser associados aos próprios contadores inteligentes endereços de *wallet*, e, através de um contrato inteligente, liquidar automaticamente a energia consumida medida.

Ao fim de 10 dias, alguns dos *prosumers* não teriam EnergyTokens para compensar os seus vizinhos. É assumido que o EnergyToken estaria disponível para negociar com outras criptomoedas ou moedas “normais” numa *Exchange*¹³ a que todos os intervenientes tivessem acesso. Deste modo, os *prosumers* 2, 3, 4, 5, 6, 7 e 8 negociariam o preço em Ether, por exemplo, preço esse pelo qual estariam dispostos a vender os seus EnergyTokens aos *prosumers* 1, 9, 10, 11 e 12.

Uma vez que ambas as partes estão interessadas em baixar o preço final das suas faturas energéticas, chegariam a um consenso entre o preço praticado entre eles, que, pela lógica económica, seria superior ao preço de venda à rede e inferior ao preço do fornecedor.

Em relação à comparação entre cenários, não há termo comparativo, uma vez que o valor que cada EnergyToken valerá dependerá, apenas, da própria comunidade e seus participantes. A *exchange* não foi implementada, devido às burocracias que isso representaria, e porque o EnergyToken é na verdade um *token* implementado numa rede de testes, não tendo valor real.

¹³ É uma empresa que permite que os clientes negociem criptomoedas por outros ativos, como moeda fiduciária convencional ou outras criptomoedas.

5.4 Micro-rede com mercado interno, transações P2P e recursos de armazenamento – Cenário D

5.4.1 Descrição do cenário D

Este cenário é caracterizado pela adição de uma bateria da comunidade. Para isso, no contrato do *token* foi criada uma função que representa uma *initial coin offer* (ICO). A ideia é o próprio contrato receber Ether. Quando alguém envia Ether para o contrato, ele tem de receber e também de devolver EnergyCoins criadas do 0. Minerando assim novos EnergyTokens, que vão aumentar o montante total de *tokens* em circulação.

Na Tabela 13 estão representados os participantes adicionais deste cenário.

Tabela 13 Participantes adicionais do cenário D

| Nome | Tipo | Função | Como foi simulado |
|-----------------------|-----------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| Bateria da comunidade | Sistema / Dispositivo | A bateria armazena a energia excedente da micro-rede, e vende-a mais tarde aos próprios <i>prosumers</i> , tornando a rede flexível. | Matlab |
| Wallet da Comunidade | Sistema / Dispositivo | Wallet da comunidade que facilita as transações associada à bateria | Ethereum <i>Wallet</i> Transferências feitas manualmente na <i>Wallet</i> Ethereum |

Para poder fazer isso implementou-se uma função de pagamentos. Em primeiro lugar definiu-se o preço de 1 EnergyToken. Este preço pretende refletir o preço do investimento da adição de capacidade ao sistema. Ou seja, 1 ET equivale a 1KWh de capacidade adicionada ao sistema.

O custo atual das baterias de íons de lítio é aproximadamente 200€/KWh, e o preço de 1Ether, no momento de escrita, é aproximadamente, 200€. Portanto, assumiu-se o preço de 1 EnergyToken em 0.02 Ether. Simulou-se que os participantes da micro-rede decidiram

investir 1 Ether em armazenamento, equivalente a 50KWh de capacidade de armazenamento.

Foi enviado 1 Ether para o contrato de criação do *token*, a partir da *wallet* da comunidade. Nesse momento, o contrato retornou 50ET que serviriam para a própria bateria comprar energia e armazenar para uso posterior.

Como a capacidade da bateria é limitada a 50KWh e o preço do KWh é 1ET, ela pode comprar e armazenar a energia de um *prosumer*, que não tem a quem vender. A bateria da comunidade pode remunerar esse *prosumer* com os EnergyTokens criados e, posteriormente, vendê-la.

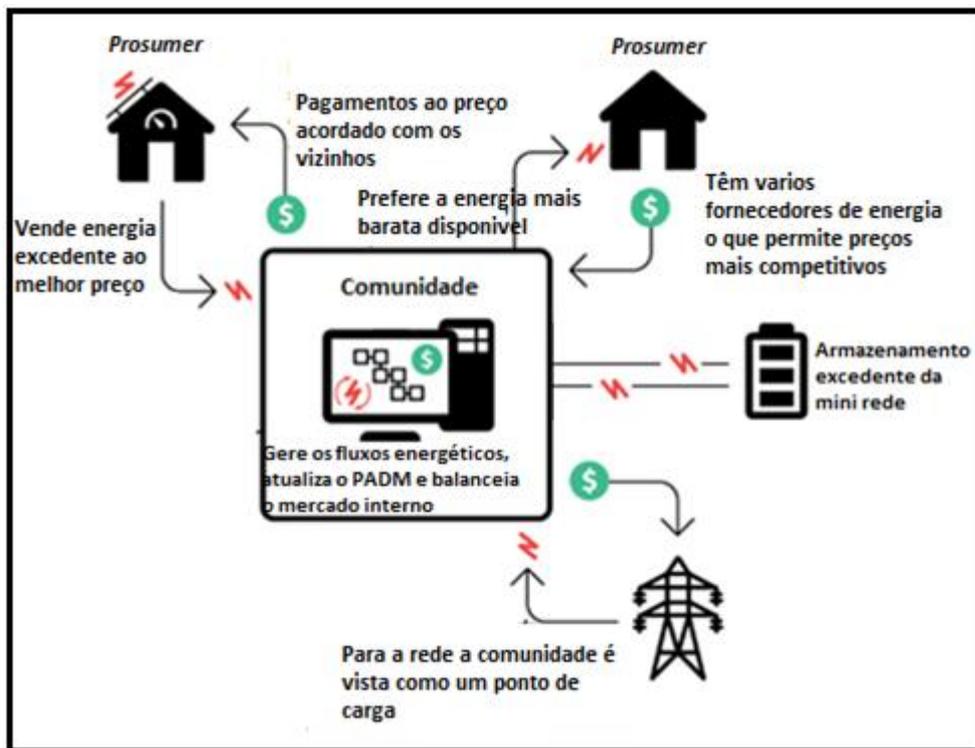
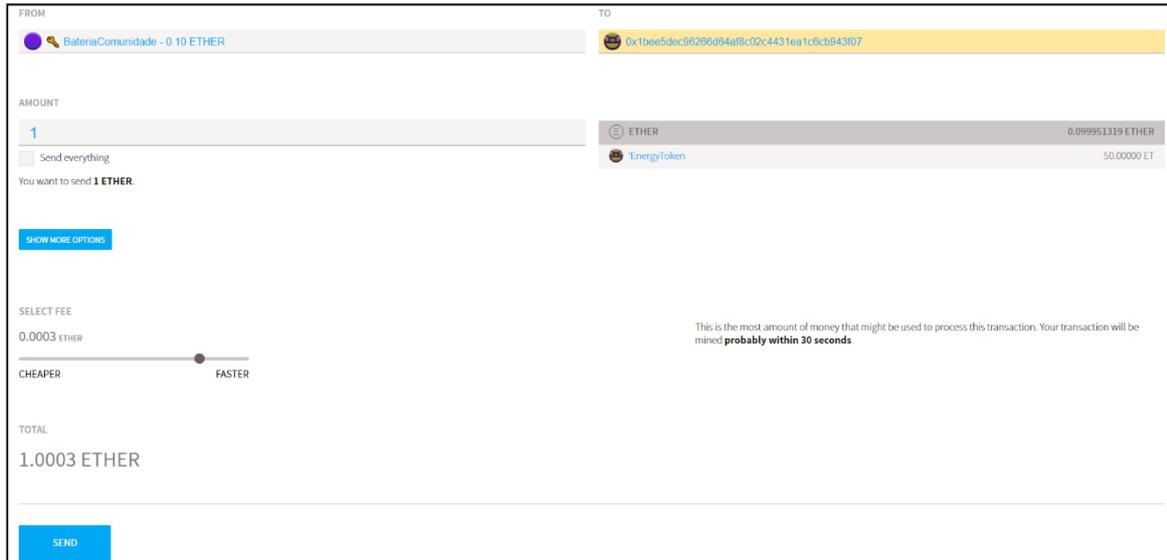


Figura 25 Interações - cenário D

5.4.2 Simulação do cenário D

Neste cenário criou-se a *wallet* da comunidade, com o endereço “0xb2916C52676369C688F8501f55DB6AD965027AAB”.

Enviou-se, a partir deste endereço, 1Ether para o contrato EnergyToken, como na Figura 26.



FROM: BateriaComunidade - 0.10 ETH

TO: 0x1bee5dec96266d94af8c02c4431ea1c6cb943f07

AMOUNT: 1

Send everything

You want to send 1 ETH.

SHOW MORE OPTIONS

SELECT FEE: 0.0003 ETH

CHEAPER ————— FASTER

TOTAL: 1.0003 ETH

SEND

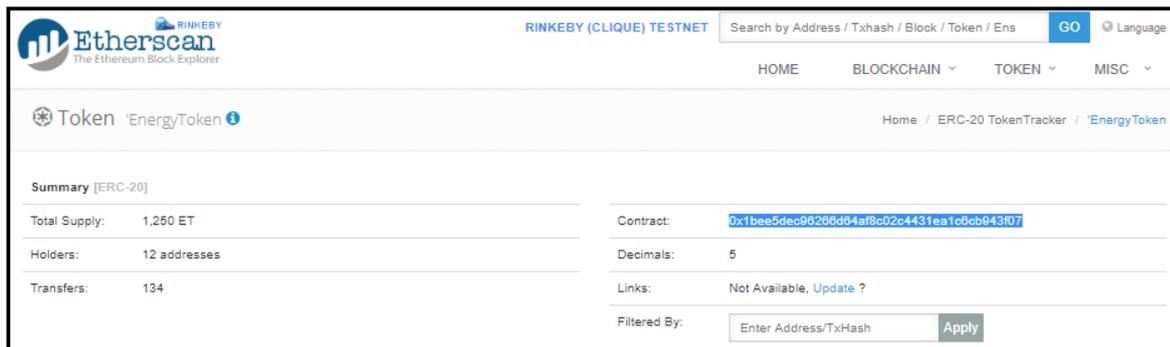
ETHER: 0.099951319 ETH

EnergyToken: 50.00000 ET

This is the most amount of money that might be used to process this transaction. Your transaction will be mined **probably within 30 seconds**.

Figura 26 Transação de 1Ether para o contrato (Anexo O)

Após a transação ter sido concluída pode-se verificar no Etherscan que o montante total de EnergyTokens em circulação aumentou para 1250ET (Figura 27). Esses 50 EnergyTokens adicionais foram transferidos automaticamente para a *wallet* criada (Figura 28).



Etherscan RINKEBY (CLIQUE) TESTNET

Search by Address / Txhash / Block / Token / Ens GO Language

HOME BLOCKCHAIN TOKEN MISC

Token EnergyToken

Home / ERC-20 TokenTracker / EnergyToken

Summary [ERC-20]

| | | | |
|---------------|--------------|-----------|--------------------------------------------|
| Total Supply: | 1,250 ET | Contract: | 0x1bee5dec96266d94af8c02c4431ea1c6cb943f07 |
| Holders: | 12 addresses | Decimals: | 5 |
| Transfers: | 134 | Links: | Not Available. Update ? |

Filtered By: Enter Address/TxHash Apply

Figura 27 Busca pelo endereço do contrato criado após a transação (Anexo P)



Figura 28 *Wallet da comunidade*

As transferências foram feitas manualmente como no cenário anterior.

5.4.3 Resultados do cenário D

5.4.3.1 Pagamentos em Euros

Do primeiro ponto de vista, podemos observar, ao comparar os gráficos da Figura 32 do Anexo D, com os gráficos do cenário anterior, a diminuição, dos montantes em dívida em euros, uma vez que mais energia é negociada em criptomoedas, especialmente nas horas em que há produção de energia solar, por volta do meio-dia. O montante a receber, em euros, é 0 para todos os *prosumers*, uma vez que eles já não vendem energia à rede porque a bateria tem capacidade para armazenar toda a energia excedente da micro-rede.

O montante total gasto calculado, isto é, o valor que cada *prosumer* tem de pagar ao fornecedor de energia (rede), no final das 24 horas, está representado na Tabela 14.

Tabela 14 *Fatura diária de cada prosumer para com o fornecedor de energia (cenário D)*

| | |
|--------------------|---------------|
| <i>Prosumer 1</i> | 7.17€ |
| <i>Prosumer 2</i> | 5.47 € |
| <i>Prosumer 3</i> | 5.33 € |
| <i>Prosumer 4</i> | 5.34 € |
| <i>Prosumer 5</i> | 3.68 € |
| <i>Prosumer 6</i> | 2.66 € |
| <i>Prosumer 7</i> | 1.36 € |
| <i>Prosumer 8</i> | 5.50 € |
| <i>Prosumer 9</i> | 4.28 € |
| <i>Prosumer 10</i> | 8.23€ |
| <i>Prosumer 11</i> | 8.23€ |
| <i>Prosumer 12</i> | 8.23 € |
| Total | 65.48€ |

A relação entre fornecedor e *prosumer* é a mesma que no cenário A, B e C. O resultado do total de montantes a liquidar de todos os *prosumers* ao fornecedor de energia é, para 24 horas, 65.48€. Comparando com o cenário C, há um decréscimo na ordem dos 4,2%.

5.4.3.2 Pagamentos em criptomoedas

Neste cenário as trocas de energia entre vizinhos são liquidadas com pagamentos P2P entre *wallets* Ethereum. Os montantes a receber e a pagar de cada um dos *prosumers*, ao minuto, estão representados na Figura 34, no anexo E.

Os montantes totais, resultantes da soma de todos os valores pagos e recebidos, de cada um dos *prosumers*, podem ser consultados na Tabela 15.

O meio de pagamento dos *prosumers* é, como já descrito, feito através de uma *wallet* da comunidade. Deste modo, cada *prosumer* submeteu transações na rede *blockchain* da Ethereum através das suas *wallets*, de modo similar ao cenário anterior.

Tabela 15 Montantes totais de ET gastos (positivos) ou ganhos (negativos) em 24 horas

| | |
|--------------------|----------|
| <i>Prosumer 1</i> | 15.20725 |
| <i>Prosumer 2</i> | -5.3271 |
| <i>Prosumer 3</i> | -1.04064 |
| <i>Prosumer 4</i> | 0.23893 |
| <i>Prosumer 5</i> | -3.24408 |
| <i>Prosumer 6</i> | -18.2792 |
| <i>Prosumer 7</i> | -13.3427 |
| <i>Prosumer 8</i> | 0.4927 |
| <i>Prosumer 9</i> | 1.94099 |
| <i>Prosumer 10</i> | 7.78461 |
| <i>Prosumer 11</i> | 7.78461 |
| <i>Prosumer 12</i> | 7.78461 |
| Bateria | 0 |

5.5 Análise dos resultados e trabalho futuro

Desenvolveu-se 4 cenários diferentes para explorar se a tecnologia *blockchain* poderia fornecer uma solução potencial para os próximos desafios no sector de energia. O estudo baseou-se na literatura disponível sobre *blockchain*, conceitos e expectativas. Através dos 4 cenários forneceu-se ideias de como a *blockchain* pode ser usada no sector da energia. Com os cenários pretendeu-se dar uma ideia dos extremos para os quais os SEE poderiam potencialmente se mover. Os cenários em si fornecem um ponto de partida para pesquisas futuras sobre o uso da tecnologia *blockchain*. Além disso, os cenários poderiam ser modelados para testar os casos e suas implicações. Para os atuais membros do ecossistema, os cenários fornecem uma representação compreensível de possíveis direções futuras às quais o mercado retalhista poder-se-ia movimentar.

A tecnologia *blockchain* é ainda uma tecnologia imatura. Portanto, durante esta pesquisa, usamos as possibilidades e conceitos teóricos da tecnologia *blockchain* para avaliar o seu impacto no ecossistema de uma micro-rede. Os cenários criados são baseados nas funcionalidades que a *blockchain* pode fornecer, mas ainda não são possíveis na prática. Assim, baseiam-se no pressuposto de que a tecnologia *blockchain* foi desenvolvida e superou os seus inconvenientes, como as restrições tecnológicas e regulatórias, que não foram levadas em conta. Portanto, para que os cenários se tornem realidade, a tecnologia *blockchain* deve ser mais desenvolvida.

O cenário A é o mais básico de todos, porque apenas existe um tipo de interligação, que é entre *prosumers* e fornecedor. Não existindo mercado interno, os *prosumers* têm de vender a totalidade de produção excedente de volta à rede.

No cenário B, incluiu-se um mercado interno à micro-rede. Chegou-se à conclusão que este cenário é inviável, uma vez que é difícil de se imaginar um meio para liquidar pagamentos na ordem dos centavos de euros.

De modo a tornar possível a liquidação de micro pagamentos, o cenário C permite que os *prosumers* negociem a energia em *tokens*. É assumido que *token* estaria disponível para negociação numa *Exchange* de criptomoedas. Mas não foi implementado, uma vez que os *token* de teste criados não têm, na realidade, valor. O cenário demonstrou que a possibilidade

de negociar energia diretamente entre *prosumers*, beneficia os próprios, uma vez que a sua fatura energética final baixa.

Para efeitos da simulação, assumiu-se que os *prosumers* liquidariam as suas dívidas para com os seus vizinhos no final do dia. No entanto, como estudado nos capítulos teóricos, cada contador inteligente poderia ter um endereço específico que representasse a *wallet* de cada *prosumer*. Este endereço poderia ser usado pelos contadores inteligentes para, automaticamente, liquidar pagamentos em tempo real, minuto a minuto. Para isso, seria necessário, no próprio contrato do *token*, desenvolver o código de maneira a permitir tal processo, de modo similar ao contadores pré-pagos da *startup* Bankymoon. E desta maneira automatizar todo o processo.

O cenário D demonstra como os membros de uma micro-rede poderiam investir em recursos energéticos distribuídos. E desta maneira, baixar ainda mais a sua fatura energética. Uma vez que o processo de balanceamento da rede favorece os consumidores, porque têm direito a mais energia barata, faz com que todos estejam interessados em recursos de armazenamento. Uma vez que quem produz mais energia pode vender a totalidade desta aos *prosumers*, em vez da rede, a um preço mais justo, beneficiando também quem tem consumos altos, uma vez que são quem tem direito a mais energia barata.

Em todos os cenários é assumido que os fluxos energéticos associados a estas transações são possíveis. E por isso, para a aplicação real destes cenários, teria de ser feito um estudo sobre sistemas de balanceamento de fluxos energéticos.

Em todos os cenários considerou-se que do ponto de vista do mercado externo, a micro-rede é vista como um único ponto. Em estudos futuros, deve-se considerar o cenário em que a micro-rede tem múltiplas conexões com o exterior, tanto com diferentes fornecedores, recursos energéticos distribuídos de outras micro-redes ou diretamente a produtores de larga escala. Isso permitiria ainda mais benefícios aos consumidores finais, uma vez que teriam a possibilidade de negociar energia com uma imensidade de recursos e ativos na rede.

Em trabalhos futuros deve-se usar a *blockchain*, não só para transferir valor, mas, também para guardar todos os dados de consumo e produção, e deste modo também estes valores poderem ser rastreados, assegurando rastreabilidade de todo o sistema. De modo a

assegurar a confiabilidade deste sistema, o contrato inteligente poderia ser programado para fornecer energia apenas quando o contrato inteligente tivesse na sua conta a quantia associada ao preço dessa energia, que seria apenas entregue ao produtor depois dessa energia ser consumida. Deste modo, não haveria quaisquer complicações para os *prosumers*, uma vez que o processo seria automático.

6 Conclusões

Uma *blockchain* é uma *ledger* digital, que é cronologicamente e continuamente atualizada, guardada criptograficamente e distribuída entre todos os participantes da rede *blockchain*. Como resultado, a tecnologia *blockchain* permite a transação de ativos físicos, digitais e intangíveis, entre contrapartes que não confiam necessariamente uns nos outros, sem a necessidade de uma terceira parte confiável.

Como a *blockchain* tem o potencial de substituir as autoridades centrais, esta tecnologia poderia descentralizar e desintermediar o ecossistema de energia e reduzir os custos de transação. Portanto, a tecnologia *blockchain* pode ser um concorrente potencial para organizações e mercados, fornecendo benefícios em termos de redução de custos, velocidade e flexibilidade.

Num processo típico de *blockchain*, as informações sobre uma transação são distribuídas pela rede *blockchain*. Os mineiros funcionam seguindo um mecanismo de consenso para validar as transações. No sector da energia, as possibilidades da tecnologia *blockchain*, tem a haver com a abertura do mercado de energia aos consumidores, a registos de transações transparentes e precisas e uma maneira eficiente de distribuir dados. Assim, a tecnologia *blockchain* poderia ajudar a facilitar a gestão das contas de eletricidade, aumentar a visibilidade dos dados e transações e simplificar a distribuição energética.

Neste estudo, estudou-se a tecnologia *blockchain*, de modo a analisar o seu potencial disruptivo no sector da energia. As tecnologias têm a capacidade de coordenar as pessoas, por exemplo, em transações económicas, pois permitem novos tipos de contratos e mercados. Desta forma, a *blockchain* pode competir com organizações e mercados.

Com base nas possibilidades teóricas da tecnologia *blockchain*, formulou-se quatro cenários futuros, numa micro-rede, para explorar o poder disruptivo da *blockchain* no sector da energia.

1. Cenário A – Micro-rede comunitária
2. Cenário B – Micro-rede com mercado interno
3. Cenário C - Micro-rede com mercado interno e transações P2P

4. Cenário D - Micro-rede com mercado interno, transações P2P e recursos de armazenamento

Estes cenários são o resultado do processo de planeamento de cenários. Durante este processo, ganhou-se uma compreensão tanto do domínio da *blockchain* quanto do domínio da evolução dos SEE (Capítulo 2 e 3). Além disso, analisou-se as aplicações e desenvolvimentos atuais da *blockchain* na área da energia (Capítulo 4). Deste modo foi possível construir uma estrutura para os cenários (Capítulo 5).

Nos cenários A e B não há implementação da tecnologia *blockchain*. Estes cenários apenas serviram para comparar a implementação da *blockchain* nos cenários C e D. Vimos que a implementação da *blockchain* afetou a configuração do ecossistema de negócios da micro-rede em questão.

A implementação da tecnologia *blockchain* levou à descentralização no ecossistema energético da micro-rede. Como resultado, o ecossistema de energia torna-se mais robusto, flexível, seguro e eficiente.

Ainda há um longo caminho a percorrer antes da *blockchain* poder ser usada da maneira apresentada. Ainda há muitas incertezas, problemas e inconvenientes que precisam de ser resolvidos. Contudo, quando nos concentramos nas possibilidades que teoricamente poderia fornecer, pode-se argumentar que a *blockchain* tem o potencial de perturbar o ecossistema energético. A *blockchain* é um potencial concorrente de organizações e mercados dentro do sector da energia.

A *blockchain* também tem o potencial para gerar ganhos de eficiência e tem o potencial de mudar todo o ecossistema de negócios do sector de energia. Como resultado, o futuro de múltiplas funções no ecossistema atual de energia torna-se questionável.

Os casos potenciais de uso de energia da tecnologia *blockchain* são muito promissores. Além de reduzir os custos de transação em todo o sistema, aumentando a eficiência dos processos e, assim, oferecem benefícios de custo para os clientes, pois a tecnologia permite interações diretas entre todas as partes envolvidas. Isso garante que a capacidade de geração existente seja utilizada de forma otimizada, enquanto a energia é disponibilizada ao melhor preço. O papel dos *prosumers* é consideravelmente fortalecido sob tal modelo.

Se a tecnologia vai ter sucesso no sector da energia, dependerá de inúmeros aspetos, tais como, que ofertas estão disponíveis para os clientes? Atualmente, diversas entidades lançaram aplicações da tecnologia no sector, mas essas aplicações teriam de ser projetadas de forma a serem fáceis de usar e eficazes.

Os custos e benefícios dos modelos *blockchain* ainda não podem ser totalmente avaliados. Os custos de transmissão e armazenamento de dados provavelmente terão um papel menor. Mas os custos para o processo de verificação (mineração), que é central para todas as aplicações *blockchain*, podem ser altos.

No geral, pode-se dizer que no momento atual a tecnologia *blockchain* demonstra ter certamente um grande potencial, principalmente do ponto de vista do consumidor final, mas deve ser desenvolvida pelos participantes do mercado. As abordagens vistas até agora podem ter um efeito disruptivo no futuro e podem exigir intervenção regulatória adicional num mercado de energia já rigidamente regulado. Se a *blockchain* oferecer benefícios para os consumidores (ou *prosumers*), será necessário um forte foco em questões de consumo.

No sector de energia, apesar de todos os desenvolvimentos, ainda se sabe pouco sobre como a tecnologia *blockchain* pode ser utilizada de forma útil. Contudo, o impacto na redução de custo e tempo pode ser imenso. Vale destacar que é esperado que o mercado de medição seja profundamente afetado, uma vez que já não serão necessários intermediários para coletar e transmitir os dados sobre geração e consumo. Outro grande benefício é que toda a eletricidade fornecida às redes poderá ser claramente atribuída a clientes individuais em minutos. Isto significa que toda a eletricidade produzida e consumida pode ser liquidada de forma muito precisa a preços variáveis.

A *blockchain*, deve abrir o caminho para um sistema de energia descentralizado. Com o aumento na capacidade de gestão do consumo de energia, os consumidores tornar-se-ão cada vez mais autónomos para decidir sobre o seu fornecimento de energia.

7 Referências bibliográficas

- [1] C. Martin, F. Starace, e J. P. Tricoire, «The Future of Electricity New Technologies Transforming the Grid Edge», 2017.
- [2] Muhammed Arafath, «Blockchain 101: Understanding The Technology’s Potential For Your Organization», 2018-08-26, 2018. [Online]. Disponível em: <https://www.entrepreneur.com/article/318682>. [Acedido: 28-Ago-2018].
- [3] Sergey Nivens, «The energy industry is being disrupted – and traditional firms can’t keep up», 2018. [Online]. Disponível em: <https://theconversation.com/the-energy-industry-is-being-disrupted-and-traditional-firms-cant-keep-up-101850>. [Acedido: 31-Ago-2018].
- [4] IPCC, *Climate Change 2013 - The Physical Science Basis*. 2014.
- [5] A. Froggatt e D. Quiggin, «The Power of Flexibility The Survival of Utilities During the Transformations of the Power Sector», n. August, 2018.
- [6] UNFCCC, «Paris Agreement», *United Nations Framework Convention on Climate Change*, 2017. [Online]. Disponível em: https://unfccc.int/files/meetings/paris_nov_2015/application/pdf/paris_agreement_english_.pdf. [Acedido: 02-Set-2018].
- [7] A. T. Seb Henbest, Elena Giannakopoulou, Matthias Kimmel, Amy Grace, Jonas Rooze, Sophie Lu, Tom Harries, Jenny Chase, Logan Goldie-Scot, Richard Chatterton, «New Energy Outlook 2018», 2018.
- [8] N. Soulopoulos, «Cost projections Batteries, vehicles and TCO», 2018.
- [9] «Electric Vehicles on the Road Are Set to Triple in Two Years - Bloomberg», 2018. [Online]. Disponível em: <https://www.bloomberg.com/news/articles/2018-05-30/electric-vehicles-on-the-road-are-set-to-triple-in-two-years>. [Acedido: 24-Ago-2018].

- [10] P. Kalkal e V. K. Garg, «Transition from conventional to modern grids: Modern grid include microgrid and smartgrid», *2017 4th Int. Conf. Signal Process. Comput. Control*, 2017.
- [11] S. Renner e C. Heinemann, «European Smart Metering Landscape Report», *Imprint*, vol. 2, n. February, pp. 1–168, 2011.
- [12] T. Zimmermann, «Are you listening to your grid_ - Power Transmission and Distribution - Energy - Home - Siemens Global Website», 2017. .
- [13] T. Katie Morley, «Your energy bills could be controlled by Google or Amazon under Government plans for “peak pricing”», 2017. [Online]. Disponível em: <https://www.telegraph.co.uk/news/2017/07/24/energy-bills-could-controlled-google-amazon-government-plans/>. [Acedido: 04-Set-2018].
- [14] Accenture, «Outsmarting Grid Security Threats POV | Accenture».
- [15] BBC News, «Hackers Behind Ukraine Power Cuts, Says US Report», *BBC News*, 2016. [Online]. Disponível em: <https://www.bbc.co.uk/news/technology-35667989>. [Acedido: 06-Ago-2018].
- [16] S. Lavrijssen e A. C. Parra, «Radical prosumer innovations in the electricity sector and the impact on prosumer regulation», *Sustain.*, vol. 9, n. 7, 2017.
- [17] I. Klaus, «Don Tapscott and Alex Tapscott: Blockchain Revolution», *New Glob. Stud.*, vol. 11, n. 1, p. 367, 2017.
- [18] David Talbot, «Moore’s Outlaws», 2010. .
- [19] Deloitte, «How does a blockchain deliver value?», 2018.
- [20] H. Natarajan, S. K. Krause, e H. L. Gradstein, «Distributed Ledger Technology (DLT) and Blockchain», *Worl Bank Group*, n. 1, pp. 1–0, 2017.
- [21] S. Nakamoto, «Bitcoin: A Peer-to-Peer Electronic Cash System», *Www.Bitcoin.Org*, p. 9, 2008.
- [22] F. Glaser, «Pervasive Decentralisation of Digital Infrastructures: A Framework for

- Blockchain enabled System and Use Case Analysis», *HICSS 2017 Proc.*, pp. 1543–1552, 2017.
- [23] D. Chaum, «Blind Signatures for Untraceable Payments», em *Advances in Cryptology*, 1983, pp. 199–203.
- [24] Toshendra Kumar Sharma, «Coins, Tokens & Altcoins: What’s the Difference? | Blockchain Council», 2018-02-16, 2018. [Online]. Disponível em: <https://www.blockchain-council.org/blockchain/coins-tokens-altcoins-whats-the-difference/>. [Acedido: 16-Jun-2018].
- [25] PWC, «Blockchain-an opportunity for energy producers and consumers?», 2017.
- [26] L. Lamport, R. Shostak, e M. Pease, «The Byzantine Generals Problem», *ACM Trans. Program. Lang. Syst.*, vol. 4, n. 3, pp. 382–401, 1982.
- [27] S. Seibold e G. Samman, «Consensus - Immutable agreement for internet of value», vol. 13, p. 26, 2016.
- [28] Blockchain, «Hash Rate», 2018. [Online]. Disponível em: <https://www.blockchain.com/charts/hash-rate>. [Acedido: 03-Mar-2018].
- [29] Blockchain, «Distribuição da Taxa de Hash», 2018. [Online]. Disponível em: <https://www.blockchain.com/pools>. [Acedido: 16-Mar-2018].
- [30] BitFury Group, «Proof of Stake versus Proof of Work», vol. 2015, pp. 1–26, 2015.
- [31] D. Schwartz, N. Youngs, e A. Britto, «The Ripple protocol consensus algorithm», *Ripple Labs Inc White Pap.*, pp. 1–8, 2014.
- [32] K. Delmolino, M. Arnett, A. Kosba, A. Miller, e E. Shi, «Step by step towards creating a safe smart contract: Lessons and insights from a cryptocurrency lab», em *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 2016, vol. 9604 LNCS, pp. 79–94.
- [33] J. Ream, Y. Chu, e D. Schatsky, «Upgrading blockchains—Smart contract use cases in industry», *Deloitte Insights*, 2016. [Online]. Disponível em:

- <https://www2.deloitte.com/insights/us/en/focus/signals-for-strategists/using-blockchain-for-smart-contracts.html>. [Acedido: 02-Jun-2018].
- [34] S. M. David Johnston, Sam Onat Yilmaz, Jeremy Kandah, Nikos Bentenitis, Farzad Hashemi, Ron Gross, Shawn Wilkinson, «The General Theory of Decentralized Applications, DApps», 2015. .
- [35] World Energy Council, «World Energy Issues Monitor 2018: Perspectives on the grand energy transition», 2018.
- [36] Santos Maria, «Dutch energy supplier BAS Nederland announces Bitcoin as its newest payment option», 2018.
- [37] Enercity, «Novo serviço: os clientes da enercity podem pagar com Bitcoin», 2016-09-16, 2016. [Online]. Disponível em: <https://www.enercity.de/presse/pressemeldungen/2016/2016-09-16-bitcoin/index.html>. [Acedido: 11-Set-2018].
- [38] S. Higgins, «How Bitcoin Brought Electricity to a South African School», *coindesk*, 2016. [Online]. Disponível em: <https://www.coindesk.com/south-african-primary-school-blockchain/>. [Acedido: 11-Set-2018].
- [39] LO3 Energy, «EXERGY TOKEN : The first energy marketplace for the new energy consumer», *Whitepaper*, 2017.
- [40] Vattenfall, «Power from your neighbours», 2016-06-13, 2016. [Online]. Disponível em: <https://news.vattenfall.com/en/article/power-your-neighbours>. [Acedido: 11-Ago-2018].
- [41] TEPCO, «TEPCO looks to the transformative potential of blockchain by investing in Electron, a UK energy technology company | TEPCO», 2018. [Online]. Disponível em: <https://www7.tepco.co.jp/newsroom/announcements/archives/2018/an180119-01-e.html>. [Acedido: 11-Set-2018].
- [42] P. Release, E. Energy, T. Firms, e B. Hamburg, «Enerchain P2P Trading», 2017-05-2017, n. November 2017, pp. 1–6, 2018.

- [43] Young Joseph, «Germany Will Use Blockchain to Avoid “Traffic Jams” On Power Grids», *cointelegraph*, 2017.
- [44] W. Thomas, «ZF , UBS , Innogy Innovation Hub Announce Jointly Developed Blockchain Car eWallet», pp. 1–3, 2017.
- [45] IBM, «TenneT unlocks distributed flexibility via IBM Blockchain», *IBM*, 2017. [Online]. Disponível em: <https://www.tennet.eu/news/detail/tennet-unlocks-distributed-flexibility-via-blockchain/>. [Acedido: 12-Ago-2018].
- [46] SolarCoin, «SolarCoin A blockchain-based solar energy incentive SolarCoin: A blockchain-based solar energy incentive», <https://solarcoin.org/>, 2018.
- [47] Wepower, «WhitePaper-WePower», 2018.
- [48] «Volt Markets - Blockchain & Renewable Energy». [Online]. Disponível em: <https://voltmarkets.com/>. [Acedido: 11-Ago-2018].
- [49] «M-PAYG». [Online]. Disponível em: <http://www.mpayg.com/>. [Acedido: 11-Set-2018].
- [50] «SunContract». [Online]. Disponível em: <https://suncontract.org/>. [Acedido: 12-Ago-2018].
- [51] «AdptEVE- The Ai-aided Energy App- for advice and optimation in solar buildings». [Online]. Disponível em: <https://sites.google.com/freel.io/english/>. [Acedido: 12-Ago-2018].
- [52] «Energi Mine I Less Energy. More Power.» [Online]. Disponível em: <https://energimine.com/>. [Acedido: 12-Ago-2018].
- [53] IBM Blockchain, «Energy Blockchain Labs». [Online]. Disponível em: <https://www.ibm.com/case-studies/f601699r07582o98>. [Acedido: 12-Ago-2018].
- [54] Kastelein Richard, «Amsterdam Event EMART Energy 2016 to Host 1st European Energy Trade over the Blockchain - Blockchain News», *Blockchain News*, 2016.
- [55] Burguer Andrew, «Blockchain Underpins Germany’s NEW 4.0 100 Percent

- Renewable Energy Plan - Microgrid Media», *microgridmedia*, 2016.
- [56] Keirns Garrett, «Austrian Utility Giant Trials Blockchain Energy Trading - CoinDesk», *coindesk*, 2017.
- [57] Higgins Stan, «BP, Wien Energie Complete Blockchain Energy Trading Trial - CoinDesk», *coindesk*, 2017.
- [58] Enkhardt Sandra, «Eon and Enel trade power using Blockchain technology for the first time – pv magazine International», *pv-magazine*, 2017.
- [59] «Qivi is going to implement blockchain into the energy sector of the Crimea | Bit.news», 2018-08-24. [Online]. Disponible em: <https://en.bit.news/qivi-going-implement-blockchain-energy-sector-crimea/>. [Acedido: 11-Set-2018].
- [60] Consensys, «Grid+ Welcome to the future of energy», 2018.
- [61] Pylon, «Pylon Network - The first decentralized energy exchange platform powered by renewable», 2018. [Online]. Disponible em: <https://pylon-network.org/>. [Acedido: 12-Ago-2018].
- [62] «Homepage : Grid Singularity». [Online]. Disponible em: <http://gridsingularity.com/>. [Acedido: 11-Jul-2018].
- [63] EWF, «Energy Web Foundation – Home». [Online]. Disponible em: <https://energyweb.org/>. [Acedido: 11-Jul-2018].
- [64] Pulido Ismael, «La energía del Blockchain | El Blog de Endesa», 2016-11-2016. [Online]. Disponible em: <https://www.elblogdeendesa.com/actualidad/energia-blockchain/>. [Acedido: 12-Set-2018].
- [65] ENGIE, «Blockchain Studio: Broadening the use and development of the Blockchain», 2018.
- [66] «Are blockchain a better way of managing electricity», 2017. [Online]. Disponible em: <https://www.engie.com/en/news/blockchain-energy/>. [Acedido: 12-Ago-2018].
- [67] Rizzo Pete, «Blockchain to Drive Wanxiang’s \$30 Billion Smart Cities Initiative -

CoinDesk», *coindesk*, 2016.

- [68] Electron, «Electron | Blockchain Systems for The Energy Sector», 2018. [Online]. Disponível em: <http://www.electron.org.uk/>. [Acedido: 11-Set-2018].
- [69] Ceo, «Laszlo Giricz Poseidon Foundation».
- [70] D. A. O. Ipci, «Decentralized Autonomous Organization “Integral Platform for Climate Initiatives”», pp. 0–31, 2017.
- [71] «Farad – Distributed Autonomous Organization». [Online]. Disponível em: <https://farad.energy/faq/>. [Acedido: 12-Ago-2018].
- [72] C. Martin, «How Blockchain Is Threatening to Kill the Traditional Utility», *Bloomberg*, 2018.
- [73] Propy Inc., «Propy, Inc. launches pilot to record real estate transfers on blockchain in the City of South Burlington, VT», *PR Newswire*, 2018. [Online]. Disponível em: <https://www.prnewswire.com/news-releases/propy-inc-launches-pilot-to-record-real-estate-transfers-on-blockchain-in-the-city-of-south-burlington-vt-300584407.html>. [Acedido: 16-Ago-2018].

ANEXOS

ANEXO B

Tabela 17 Exemplos gerais de casos de uso para contratos inteligentes e DApps [32]

| Casos de uso | | O que faz? |
|----------------------|----------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Serviços Financeiros | Compensação e liquidação comercial | Gere os fluxos aprovados entre partes, calcula valores de liquidação e transfere os fundos automaticamente |
| | Pagamentos via cupão | Calcula automaticamente e liquida pagamentos via cupões e retorna o montante que sobra bem como a expiração |
| | Processamento de reclamação de seguros | Executa a verificação de erros, o roteamento e os fluxos de trabalho de aprovação e calcula o pagamento com base no tipo de reclamação e na política subjacente |
| | Micro seguros | Calcula e transfere micro pagamentos baseados nos dados de utilização de dispositivos baseados na IoT, por exemplo, relativas a um sistema de pagamento de dívidas ou de cobrir custos à medida que surgem |
| Saúde e ciência | Registro médico eletrônico | Providencia transferências ou acessos a registros médicos de saúde mediante aprovação de várias assinaturas entre pacientes e provedores |
| | Acesso aos dados de saúde populacional | Concede acesso ao investigador a certas informações pessoais de saúde; podem ser transferidos automaticamente micro pagamentos ao paciente pela colaboração |
| | Rastreamento pessoal de saúde | Rastreia as ações relacionadas à saúde dos pacientes por meio de dispositivos de IoT e gera automaticamente recompensas com base em marcos específicos |

| | | |
|--------------------------------------|-------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Tecnologia, média e telecomunicações | Distribuição de <i>royalties</i> | Calcula e distribui pagamentos de direitos autorais a artistas e outras partes de acordo com o contrato |
| Energia e recursos | Estações de carregamento de VE autónomas | Processa-se um depósito permitindo à estação de carregamento carregar o VE, e retorna os fundos remanescentes quando o carregamento estiver completado |
| Sector público | Manutenção de registos | Atualiza registos de ações de empresas privadas e registos de tabelas de capitalização e distribui as comunicações aos acionistas |
| Interprofissional | Cadeia de suprimentos e documentação de finanças comerciais | Transfere pagamentos mediante aprovação de várias assinaturas para cartas de crédito e emite pagamentos portuários mediante alteração de custódia para conhecimentos de embarque |
| | Procedência e história do produto | Facilita o processo de cadeia de custódia para produtos na cadeia de fornecimento onde a parte em custódia é capaz de registar evidências sobre o produto |
| | Transações P2P | Combina partes a transferir pagamentos automaticamente para várias aplicações P2P: empréstimos, seguros, créditos de energia, etc. |
| | Votação | Valida os critérios do eleitor, os registos votam na <i>blockchain</i> e inicia ações específicas como resultado do voto maioritário |

ANEXO C

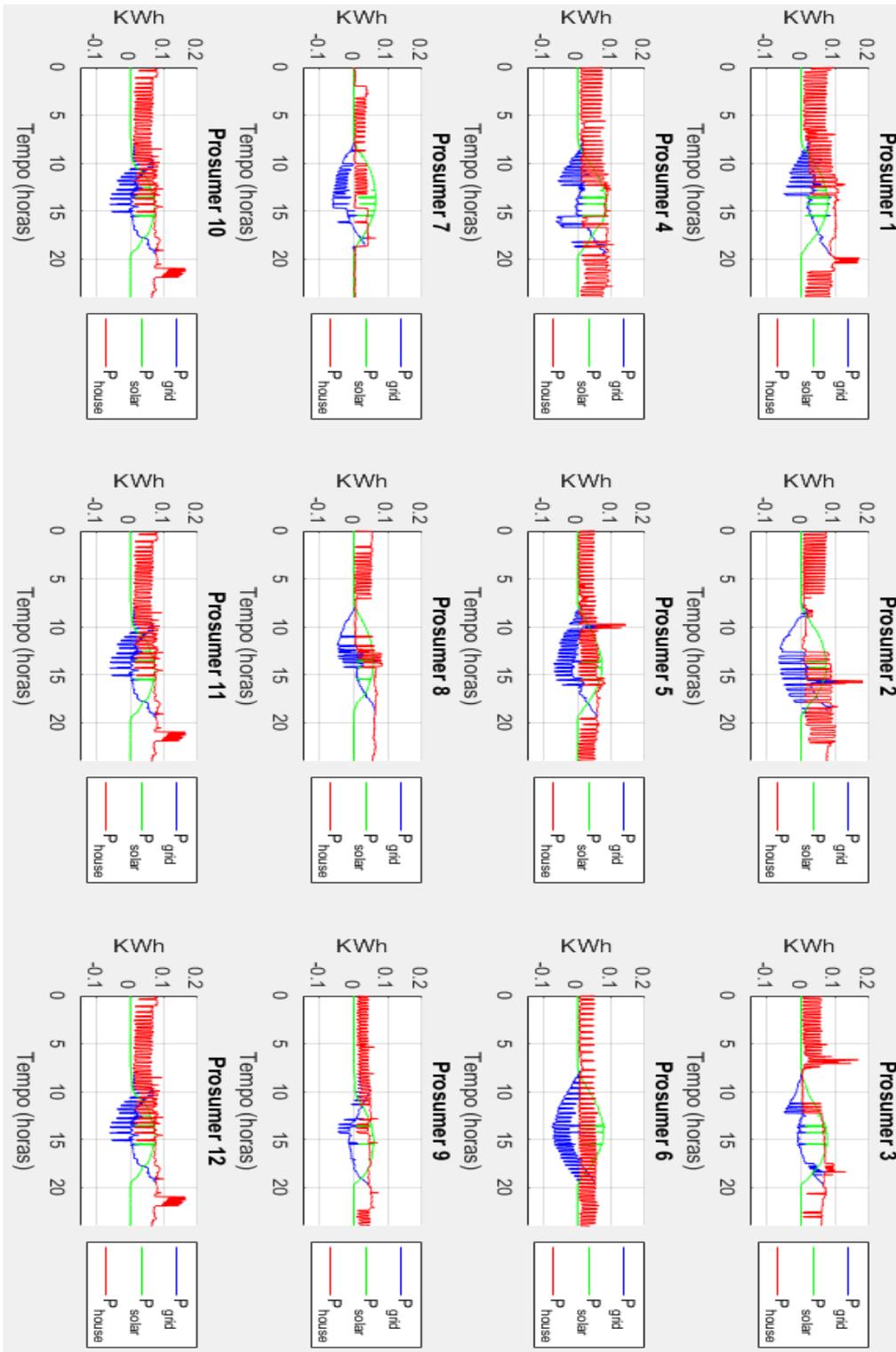


Figura 29 Dados do consumo e produção de cada *prosumer*

ANEXO D

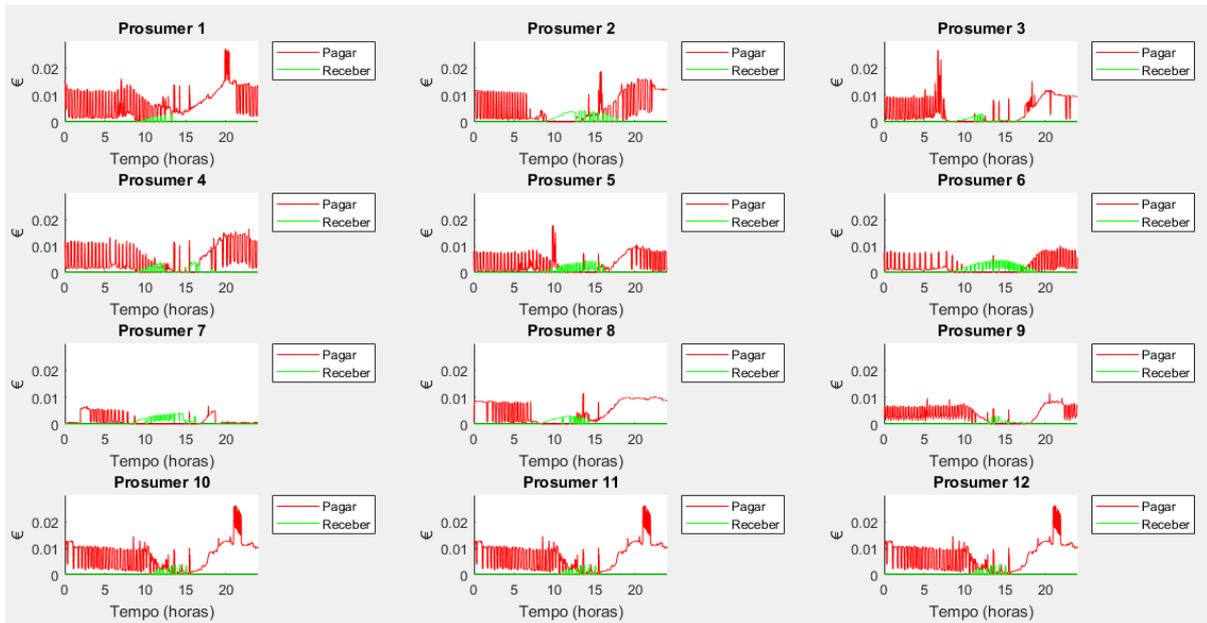


Figura 30 Dados dos pagamentos ao minuto ao longo de 24 horas (cenário A)

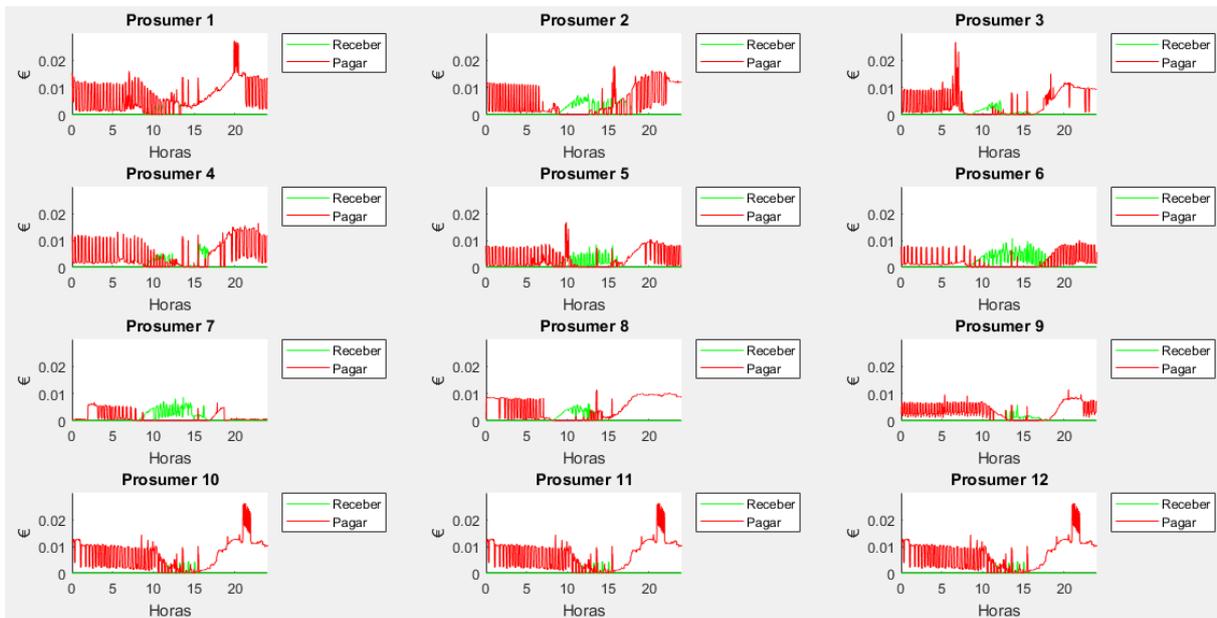


Figura 31 Dados dos pagamentos ao minuto ao longo de 24 horas (cenário B)

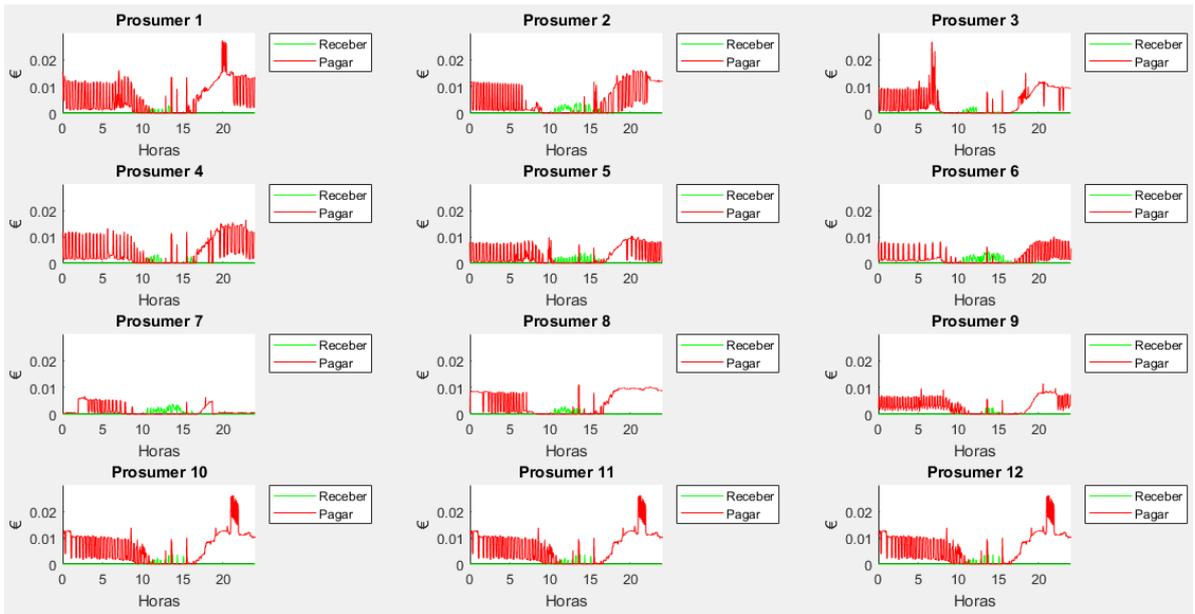


Figura 33 Dados dos pagamentos ao minuto ao longo de 24 horas (cenário C)

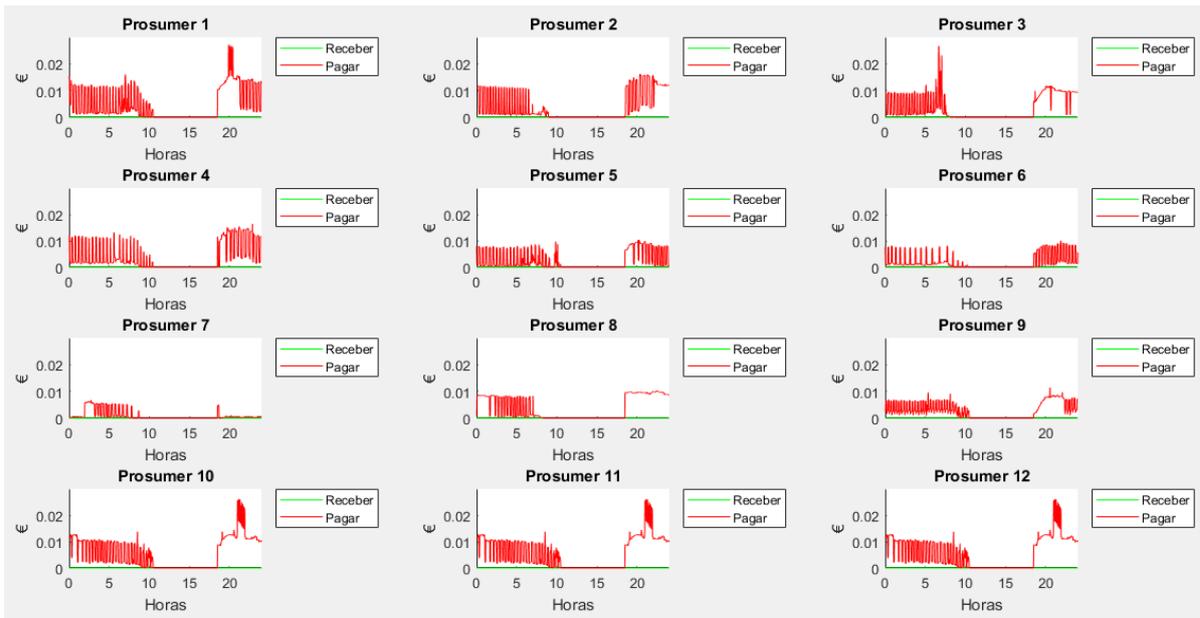


Figura 32 Dados dos pagamentos ao minuto ao longo de 24 horas (cenário D)

ANEXO E

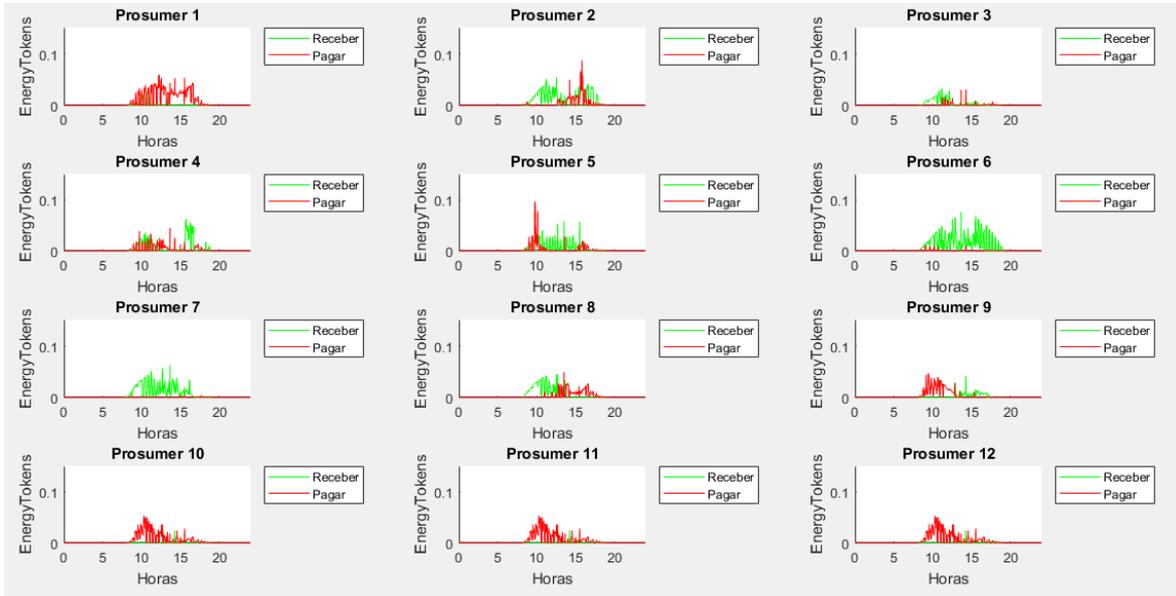


Figura 35 Dados dos pagamentos, em EnergyTokens, ao minuto ao longo de 24 horas (cenário C)

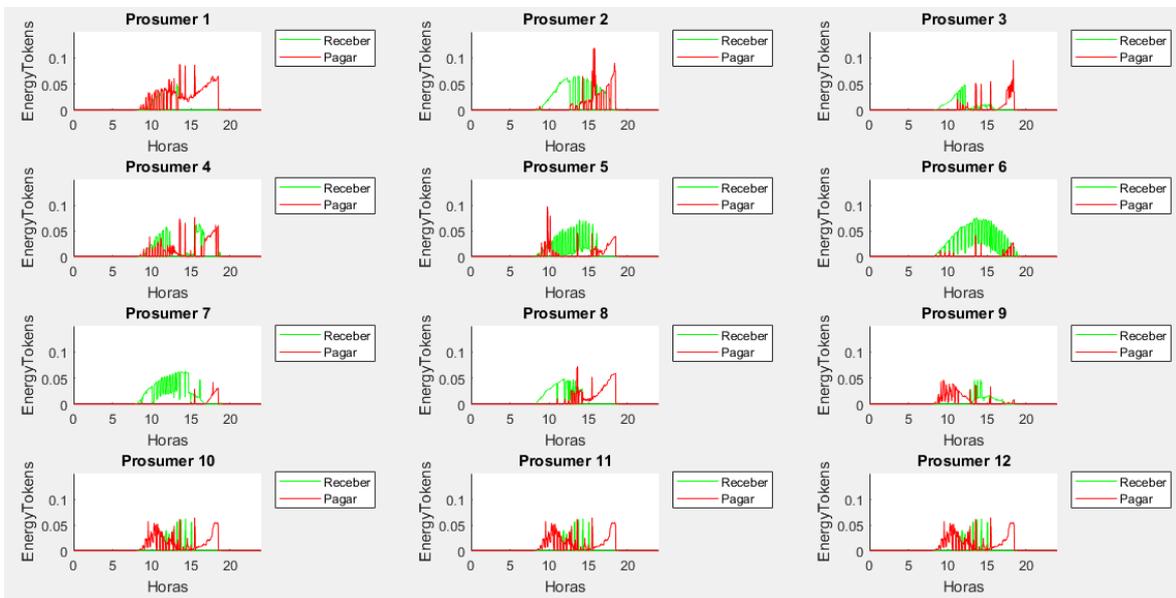


Figura 34 Dados dos pagamentos, em EnergyTokens, ao minuto ao longo de 24 horas (cenário D)

ANEXO F

Tabela 18 Fatura de cada *prosumer* em euros (cenário B)

| | | | | | | | | | | | | | |
|-------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|-------------|-------------|-------------|------------|
| | Prosumer 1 | Prosumer 2 | Prosumer 3 | Prosumer 4 | Prosumer 5 | Prosumer 6 | Prosumer 7 | Prosumer 8 | Prosumer 9 | Prosumer 10 | Prosumer 11 | Prosumer 12 | Fornecedor |
| Prosumer 1 | 0 € | 0.00039 | 0.00191 € | 0.00548 € | 0.01316 € | 0.00103 € | 0.00535 € | 0.0041 € | 0.02615 € | 0.02325 € | 0.02325 € | 0.02325 € | 0.09305 € |
| Prosumer 2 | 0.22321 € | 0 € | 0.02148 € | 0.06828 € | 0.05622 € | 0.00422 € | 0.06549 € | 0.10396 € | 0.06215 € | 0.13846 € | 0.13846 € | 0.13846 € | 0.41187 € |
| Prosumer 3 | 0.07411 € | 0.01447 € | 0 € | 0.02093 € | 0.02764 € | 0.00269 € | 0.00006 € | 0.01037 € | 0.05872 € | 0.06215 € | 0.06215 € | 0.06215 € | 0.15004 € |
| Prosumer 4 | 0.14299 € | 0.09734 | 0.00675 € | 0 € | 0.05913 € | 0.00304 € | 0.00019 € | 0.06004 € | 0.04979 € | 0.07209 € | 0.07209 € | 0.07209 € | 0.16903 € |
| Prosumer 5 | 0.14085 € | 0.04028 € | 0.00573 € | 0.03079 € | 0 € | 0.00266 € | 0.00019 € | 0.0505 € | 0.04974 € | 0.07063 € | 0.07063 € | 0.07063 € | 0.305 € |
| Prosumer 6 | 0.35576 € | 0.14748 € | 0.02873 € | 0.0899 € | 0.08408 € | 0 € | 0.00755 € | 0.13861 € | 0.10644 € | 0.17583 € | 0.17583 € | 0.17583 € | 0.56407 € |
| Prosumer 7 | 0.2582 € | 0.08075 € | 0.0159 € | 0.0597 € | 0.0645 € | 0.00678 € | 0 € | 0.07719 € | 0.11331 € | 0.15242 € | 0.15242 € | 0.15242 € | 0.43935 € |
| Prosumer 8 | 0.11989 € | 0.0083 € | 0.00798 € | 0.04448 € | 0.05672 € | 0.00586 € | 0.00101 € | 0 € | 0.11014 € | 0.12002 € | 0.12002 € | 0.12002 € | 0.19675 € |
| Prosumer 9 | 0.07518 € | 0.04581 € | 0.00499 € | 0.01244 € | 0.00903 € | 0.00095 € | 0.00048 € | 0.03512 € | 0 € | 0.01509 € | 0.01509 € | 0.01509 € | 0.10266 € |
| Prosumer 10 | 0.0259 € | 0.00726 € | 0.00134 € | 0.00511 € | 0.00003 € | 0.0004 € | 0 € | 0.00857 € | 0 € | 0 € | 0 € | 0 € | 0.12224 € |
| Prosumer 11 | 0.0259 € | 0.00726 € | 0.00134 € | 0.00511 € | 0.00003 € | 0.0004 € | 0.00744 € | 0.00857 € | 0 € | 0 € | 0 € | 0 € | 0.12224 € |
| Prosumer 12 | 0.0259 € | 0.00726 € | 0.00134 € | 0.00511 € | 0.00003 € | 0.0004 € | 0.00744 € | 0.00857 € | 0 € | 0 € | 0 € | 0 € | 0.12224 € |
| Fornecedor | 8.29231 | 6.23059 € | 5.88235 € | 6.14362 € | 4.12226 € | 2.82471 € | 1.61472 € | 6.35793 € | 4.3828 € | 8.90372 € | 8.90372 € | 8.90372 € | 0 € |

ANEXO G

Tabela 19 Montantes a pagar em EnergyTokens entre prosumers (cenário A)

| | | | | | | | | | | | |
|-------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|-------------|-------------|-------------|
| Prosumer 1 | Prosumer 2 | Prosumer 3 | Prosumer 4 | Prosumer 5 | Prosumer 6 | Prosumer 7 | Prosumer 8 | Prosumer 9 | Prosumer 10 | Prosumer 11 | Prosumer 12 |
| 0 ET | 0.00275ET | 0.01361ET | 0.03911ET | 0.09399ET | 0.00739ET | 0 ET | 0.02927ET | 0.18676ET | 0.16609ET | 0.16609ET | 0.16609ET |
| 1.59437ET | 0ET | 0.15343ET | 0.48771ET | 0.40156ET | 0.03822ET | 0.03015ET | 0.46776ET | 0.74256ET | 0.989ET | 0.16609ET | 0.16609ET |
| 0.52932ET | 0.10338ET | 0ET | 0.14948ET | 0.1974ET | 0.01925ET | 0.00046ET | 0.07409ET | 0.41942ET | 0.44396ET | 0.989ET | 0.989ET |
| 1.02138ET | 0.69528ET | 0.04824ET | 0ET | 0.42237ET | 0.02172ET | 0.00587ET | 0.42883ET | 0.35561ET | 0.51494ET | 0.44396ET | 0.44396ET |
| 1.00609ET | 0.2877ET | 0.04092ET | 0.21993ET | 0ET | 0.01897ET | 0.00136ET | 0.36071ET | 0.35526ET | 0.50447ET | 0.51494ET | 0.51494ET |
| 2.54112ET | 1.05342ET | 0.20522ET | 0.64216ET | 0.60057ET | 0ET | 0.05395ET | 0.9901ET | 0.76031ET | 1.25591ET | 0.50447ET | 0.50447ET |
| 1.84428ET | 0.57676ET | 0.11355ET | 0.42643ET | 0.46072ET | 0.04839ET | 0ET | 0.55135ET | 0.80933ET | 1.08874ET | 1.25591ET | 1.25591ET |
| 0.85639ET | 0.05932ET | 0.057ET | 0.3177ET | 0.40516ET | 0.04184ET | 0.00724ET | 0ET | 0.78669ET | 0.85727ET | 1.08874ET | 1.08874ET |
| Prosumer 9 | 0.53697ET | 0.32722ET | 0.03565ET | 0.08888ET | 0.06449ET | 0.00678ET | 0.00345ET | 0.25088ET | 0ET | 0.10779 ET | 0.85727ET |
| Prosumer 10 | 0.18498ET | 0.05184ET | 0.00956ET | 0.03652ET | 0.00019ET | 0.00283ET | 0ET | 0.05315ET | 0.06123ET | 0ET | 0.10779ET |
| Prosumer 10 | 0.18498ET | 0.05184ET | 0.00956ET | 0.03652ET | 0.00019ET | 0.00283ET | 0ET | 0.05315ET | 0.06123ET | 0ET | 0ET |
| Prosumer 11 | 0.18498ET | 0.05184ET | 0.00956ET | 0.03652ET | 0.00019ET | 0.00283ET | 0ET | 0.05315ET | 0.06123ET | 0ET | 0ET |
| Prosumer 12 | 0.18498ET | 0.05184ET | 0.00956ET | 0.03652ET | 0.00019ET | 0.00283ET | 0ET | 0.05315ET | 0.06123ET | 0ET | 0ET |

ANEXO H

Tabela 20 Montantes a pagar em EnergyTokens entre *prosumers* (cenário D)

| | | | | | | | | | | | | | |
|-------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|-------------|-------------|-------------|------------|
| | Prosumer 1 | Prosumer 2 | Prosumer 3 | Prosumer 4 | Prosumer 5 | Prosumer 6 | Prosumer 7 | Prosumer 8 | Prosumer 9 | Prosumer 10 | Prosumer 11 | Prosumer 12 | Bateria |
| Prosumer 1 | 0 ET | 0.00275ET | 0.01361ET | 0.03911ET | 0.09399ET | 0.00739ET | 0 ET | 0.02927ET | 0.18676ET | 0.16609ET | 0.16609ET | 0.16609ET | 1.46756 ET |
| Prosumer 2 | 1.59437ET | 0ET | 0.15343ET | 0.48771ET | 0.40156ET | 0.03822ET | 0.03015ET | 0.46776ET | 0.74256ET | 0.989ET | 0.16609ET | 0.16609ET | 6.49591 ET |
| Prosumer 3 | 0.52932ET | 0.10338ET | 0ET | 0.14948ET | 0.1974ET | 0.01925ET | 0.00046ET | 0.07409ET | 0.41942ET | 0.44396ET | 0.989ET | 0.989ET | 2.36645 ET |
| Prosumer 4 | 1.02138ET | 0.69528ET | 0.04824ET | 0ET | 0.42237ET | 0.02172ET | 0.00587ET | 0.42883ET | 0.35561ET | 0.51494ET | 0.44396ET | 0.44396ET | 2.66591 ET |
| Prosumer 5 | 1.00609ET | 0.2877ET | 0.04092ET | 0.21993ET | 0ET | 0.01897ET | 0.00136ET | 0.36071ET | 0.35526ET | 0.50447ET | 0.51494ET | 0.51494ET | 4.81028 ET |
| Prosumer 6 | 2.54112ET | 1.05342ET | 0.20522ET | 0.64216ET | 0.60057ET | 0ET | 0.05395ET | 0.9901ET | 0.76031ET | 1.25591ET | 0.50447ET | 0.50447ET | 8.89633 ET |
| Prosumer 7 | 1.84428ET | 0.57676ET | 0.11355ET | 0.42643ET | 0.46072ET | 0.04839ET | 0ET | 0.55135ET | 0.80933ET | 1.08874ET | 1.25591ET | 1.25591ET | 6.92921 ET |
| Prosumer 8 | 0.85639ET | 0.05932ET | 0.057ET | 0.3177ET | 0.40516ET | 0.04184ET | 0.00724ET | 0ET | 0.78669ET | 0.85727ET | 1.08874ET | 1.08874ET | 3.10303 ET |
| Prosumer 9 | 0.53697ET | 0.32722ET | 0.03565ET | 0.08888ET | 0.06449ET | 0.00678ET | 0.00345ET | 0.25088ET | 0ET | 0.10779 ET | 0.85727ET | 0.85727ET | 1.61913 ET |
| Prosumer 10 | 0.18498ET | 0.05184ET | 0.00956ET | 0.03652ET | 0.00019ET | 0.00283ET | 0ET | 0.05315ET | 0.06123ET | 0ET | 0.10779ET | 0.10779ET | 1.928ET |
| Prosumer 11 | 0.18498ET | 0.05184ET | 0.00956ET | 0.03652ET | 0.00019ET | 0.00283ET | 0ET | 0.05315ET | 0.06123ET | 0ET | 0ET | 0ET | 1.928ET |
| Prosumer 12 | 0.18498ET | 0.05184ET | 0.00956ET | 0.03652ET | 0.00019ET | 0.00283ET | 0ET | 0.05315ET | 0.06123ET | 0ET | 0 ET | 0ET | 1.928ET |
| Bateria | 7.0611ET | 4.79022ET | 3.45419ET | 4.968ET | 2.72372ET | 1.02071ET | 1.58103ET | 5.38644ET | 0.59818ET | 4.18474ET | 4.18474ET | 4.18474ET | 0ET |

ANEXO I

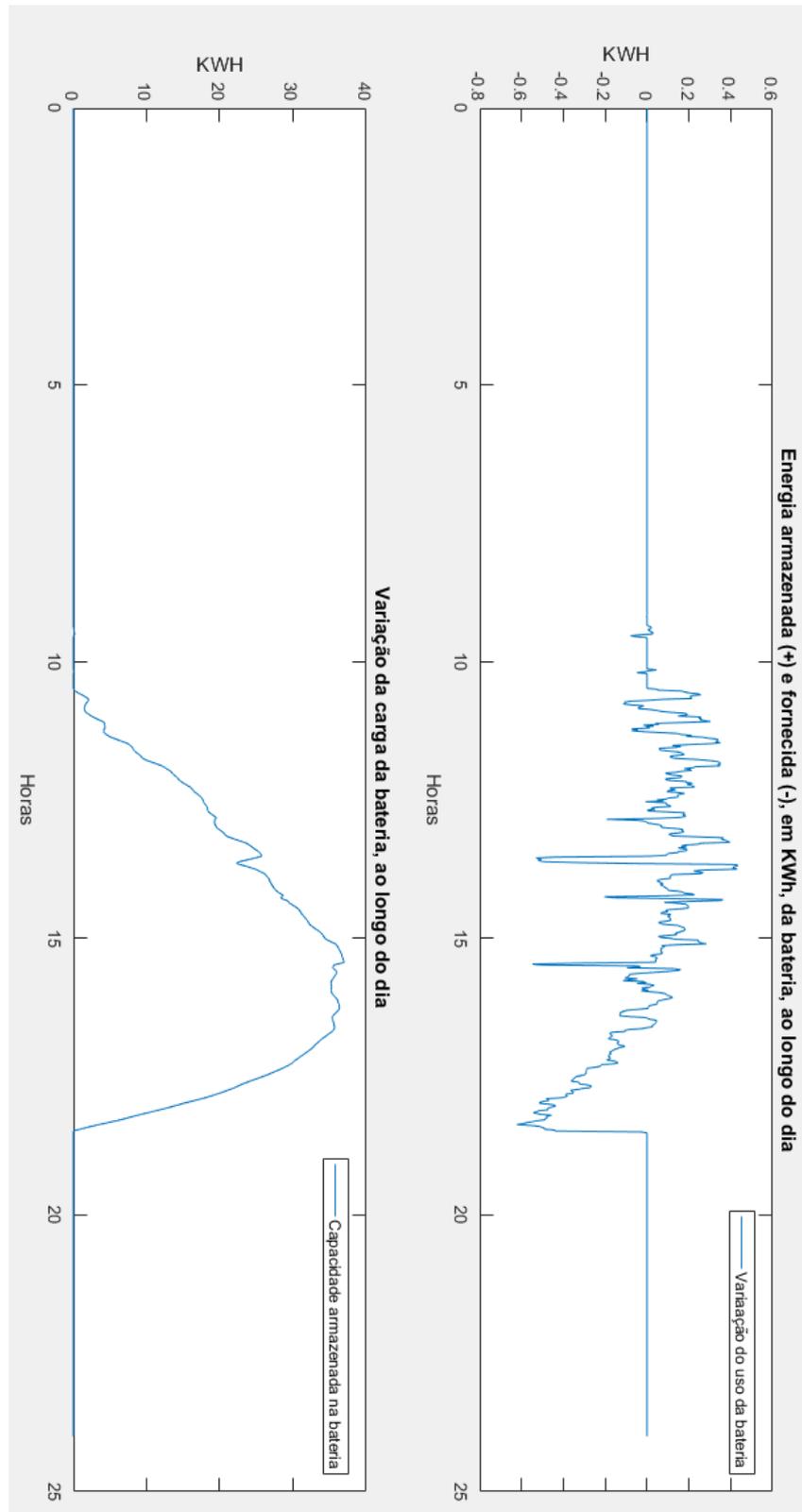


Figura 36 Gráficos da bateria

ANEXO J

The screenshot shows the Etherscan interface for the 'EnergyToken' (ERC-20). The search bar at the top contains the contract address '0x1bee5bec962669d4af8c02c4431ea1c6b943f07'. The search results indicate that there are 0 holders and 0 transfers for this contract. A yellow message box at the bottom of the search results states 'There are no matching entries'.

Summary [ERC-20]

| | | | |
|---------------|-------------|-----------|-------------------------------------------|
| Total Supply: | 1,200 ET | Contract: | 0x1bee5bec962669d4af8c02c4431ea1c6b943f07 |
| Holders: | 0 addresses | Decimals: | 5 |
| Transfers: | 0 | Links: | Not Available. Update ? |

Filtered By:

Transfers:

1/1 A Total Of 0 transactions found

| TxHash | Age | From | To | Quantity |
|-------------------------------|-----|------|----|----------|
| There are no matching entries | | | | |

Navigation:

Figura 37 Busca pelo endereço do contrato criado

ANEXO L

| Transfers | Holders | ReadContract | Write Contract | Beats |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|----------------------|-----------------------|----------|
| <p>12 A Total Of 12 transactions found</p> <p> First Prev Page 1 of 1 Next Last </p> | | | | |
| TXHash | Age | From | To | Quantity |
| 0x01ec55792a8b8... | 18 secs ago | 0x1a2f783b954fb27... | 0xaa321a017d9865... | 100 |
| 0xd06473739e80c7... | 33 secs ago | 0x1a2f783b954fb27... | 0x9397cc01822f93... | 100 |
| 0x7ac1d47dcd2fc2e... | 33 secs ago | 0x1a2f783b954fb27... | 0x30299d006bed784... | 100 |
| 0xe349f53bdcd88a5... | 48 secs ago | 0x1a2f783b954fb27... | 0x7c55e0225a122e... | 100 |
| 0x2b20e7e3de7136... | 48 secs ago | 0x1a2f783b954fb27... | 0x33b32a1b6b4e80... | 100 |
| 0xa5331f20c854e50... | 48 secs ago | 0x1a2f783b954fb27... | 0x8be06475e01b890... | 100 |
| 0xb1a91c082cdaf09... | 1 min ago | 0x1a2f783b954fb27... | 0x8f7f784a86c3e3d6... | 100 |
| 0x3c474c35e0da28... | 1 min ago | 0x1a2f783b954fb27... | 0x59347802cca27b... | 100 |
| 0xeeb05ff954a074d... | 1 min ago | 0x1a2f783b954fb27... | 0xa70a520430bc8f... | 100 |
| 0xf8540ec7e2fc8e5... | 1 min ago | 0x1a2f783b954fb27... | 0xbd8c10e585f03e1... | 100 |
| 0x2d0b380ba9138b... | 1 min ago | 0x1a2f783b954fb27... | 0x6f03272af70b0c8... | 100 |
| 0x77efcd3a80b51ae... | 5 mins ago | 0x1a2f783b954fb27... | 0x08e7b37987d083... | 100 |

Figura 38 Primeiras transações

ANEXO M

The screenshot shows a transaction confirmation screen. At the top, it is divided into 'FROM' and 'TO' sections. The 'FROM' section shows 'Prosumer 1 - 0.01 ETHER'. The 'TO' section shows an 'ETHER' icon, the address '0xaa821A017D9685e44D03aE81C5d568a8d366e03', and the amount '100.87115 ET'. Below this, the 'AMOUNT' section displays '1.59437' and a 'Send everything' checkbox. A message states: 'You want to send 1.59437 ET of EnergyToken.' The 'SELECT FEE' section shows a fee of '0.0000363 ETHER' and a slider between 'CHEAPER' and 'FASTER'. The 'TOTAL' section shows '1.59437 ET' and 'Estimated fee: 0.0000363 ETHER'. A blue 'SEND' button is at the bottom. A note at the bottom right states: 'This is the most amount of money that might be used to process this transaction. Your transaction will be mined probably within 30 seconds.'

FROM

Prosumer 1 - 0.01 ETHER

TO

ETHER

0xaa821A017D9685e44D03aE81C5d568a8d366e03

100.87115 ET

AMOUNT

1.59437

Send everything

You want to send 1.59437 ET of EnergyToken.

SELECT FEE

0.0000363 ETHER

CHEAPER

FASTER

TOTAL

1.59437 ET

Estimated fee: 0.0000363 ETHER

SEND

This is the most amount of money that might be used to process this transaction. Your transaction will be mined probably within 30 seconds.

Figura 39 Exemplo de transação manual entre *prosumer 1* e *prosumer 2*

ANEXO N

| TxHash | Age | From | To | Quantity |
|----------------------|--------------------|----------------------|----------------------|----------|
| 0xb0dc5862577643... | 8 mins ago | 0x08e7b37967d083... | 0x6f03272af7db0c8... | 0.18498 |
| 0xae49837105bade... | 12 mins ago | 0x08e7b37967d083... | 0xbd8c10e585f03e1... | 0.18498 |
| 0x9011eca52d5ab1... | 17 mins ago | 0x08e7b37967d083... | 0xa700a520430bc6f... | 0.18498 |
| 0x1aad17b85d001d... | 22 mins ago | 0x08e7b37967d083... | 0x569347802cca27b... | 0.53897 |
| 0x0888bddd78aacd... | 26 mins ago | 0x08e7b37967d083... | 0x87f784a863a3d6... | 0.85639 |
| 0x70a61a163e0843... | 30 mins ago | 0x08e7b37967d083... | 0x8e6e479e01b860... | 1.84428 |
| 0x681619e35d0583... | 34 mins ago | 0x08e7b37967d083... | 0x33b32a1b9b4c80... | 2.54112 |
| 0x45b9b85405beaf... | 39 mins ago | 0x08e7b37967d083... | 0x7c55e0225a122c... | 1.00609 |
| 0x8e8807ddd75abf0... | 44 mins ago | 0x08e7b37967d083... | 0x30299d08bed784... | 1.02138 |
| 0xc8b5d35b910b... | 52 mins ago | 0x08e7b37967d083... | 0x9397ccc1822f93... | 0.52932 |
| 0xdede80ac795005... | 1 hr ago | 0x08e7b37967d083... | 0xaa321a017d9685... | 1.59437 |
| 0x0e57eae8b4f931b... | 1 hr 6 mins ago | 0x6f03272af7db0c8... | 0x08e7b37967d083... | 0.16609 |
| 0x7701385b1b0a53... | 1 hr 7 mins ago | 0xbd8c10e585f03e1... | 0x08e7b37967d083... | 0.16609 |
| 0xa1415d384dace0... | 1 hr 7 mins ago | 0xa700a520430bc6f... | 0x08e7b37967d083... | 0.16609 |
| 0x4dbd1ab1acef3d5... | 1 hr 8 mins ago | 0x569347802cca27b... | 0x08e7b37967d083... | 0.16676 |
| 0x068f526cb431894... | 1 hr 8 mins ago | 0x87f784a863a3d6... | 0x08e7b37967d083... | 0.02927 |
| 0x1b6f93b1f2287a8... | 1 hr 10 mins ago | 0x33b32a1b9b4c80... | 0x08e7b37967d083... | 0.00739 |
| 0x67bade97e93ae1... | 1 hr 11 mins ago | 0x7c55e0225a122c... | 0x08e7b37967d083... | 0.09399 |
| 0xc65242b0292a1b... | 1 hr 12 mins ago | 0x30299d08bed784... | 0x08e7b37967d083... | 0.03911 |
| 0x406c68a70dc33... | 1 hr 12 mins ago | 0x8937ccc1822f93... | 0x08e7b37967d083... | 0.01361 |
| 0x0071cfae802961d... | 1 hr 13 mins ago | 0xaa321a017d9685... | 0x08e7b37967d083... | 0.00275 |
| 0x77e1cd3a80b51ae... | 19 hrs 33 mins ago | 0x1a2f783b954fb27... | 0x08e7b37967d083... | 100 |

Figura 40 Transações associadas ao endereço de wallet do prosumer 1

ANEXO O

The screenshot displays an Ethereum transaction interface. At the top, the 'FROM' field shows 'BateriaComunidade - 0.10 ETHER'. The 'TO' field shows 'EnergyToken' with the address '0x1b6e5dec68286d848c02c4431ea1c8db943107'. The 'AMOUNT' is set to '1'. A 'SEND' button is visible at the bottom left. The 'SELECT FEE' section shows a fee of '0.0003 ETHER' and a slider between 'CHEAPER' and 'FASTER'. A note at the bottom states: 'This is the most amount of money that might be used to process this transaction. Your transaction will be mined probably within 30 seconds.'

| Field | Value |
|------------|--------------------------------------------------------|
| FROM | BateriaComunidade - 0.10 ETHER |
| TO | EnergyToken (0x1b6e5dec68286d848c02c4431ea1c8db943107) |
| AMOUNT | 1 |
| SELECT FEE | 0.0003 ETHER |
| CHEAPER | FASTER |
| TOTAL | 1.0003 ETHER |
| SEND | SEND |

This is the most amount of money that might be used to process this transaction. Your transaction will be mined **probably within 30 seconds.**

Figura 41 Transação de 1Ether para o contrato

ANEXO P

The screenshot displays the Rinkeby Etherscan interface for the EnergyToken. At the top, the Etherscan logo and 'The Ethereum Block Explorer' are visible. The page title is 'Token EnergyToken'. A search bar is present with the text 'Search by Address / Txhash / Block / Token / Ens' and a 'GO' button. Navigation links include 'HOME', 'BLOCKCHAIN', 'TOKEN', and 'MISC'. The breadcrumb trail shows 'Home / ERC-20 TokenTracker / EnergyToken'. The 'Summary [ERC-20]' section contains the following data:

| | | | |
|---------------|--------------|-----------|-----------------------------------------------------------|
| Total Supply: | 1,250 ET | Contract: | 0x1bee5dec98286d84a8c02c4431ea1c6db843b07 |
| Holders: | 12 addresses | Decimals: | 5 |
| Transfers: | 134 | Links: | Not Available, Update ? |

At the bottom, there is a 'Filtered By:' section with an input field containing 'Enter Address/TxHash' and an 'Apply' button.

Figura 42 Busca pelo endereço do contrato criado após a transação

