

Considerações Iniciais Para Um Modelo De Comércio P2P De Eletricidade Gerada A partir De Energia Solar Fotovoltaica Baseado Na Tecnologia Blockchain

Sarkkinen Veikka¹, Alex Alcântara Renó², Ali Khosravi³, Juan Garcia Pabon⁴

¹ Department of Mechanical Engineering, School of Engineering, Aalto University, Finlandia. Email: veikka.sarkkinen@aalto.fi

² Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, Brasil. Email: eng.alexnivaldo@gmail.com

³ SDU Mechatronics (CIM), Department of Mechanical and Electrical Engineering, University of Southern, Dinamarca. Email: alkh@sdu.dk

⁴ Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, Brasil. Email: jjgp@unifei.edu.br

Resumo

O artigo propôs realiza uma lista e discussão dos aspectos que devem ser considerados antes de implementar a tecnologia Blockchain no comercio de energia renovável. No modelo proposto, a eletricidade é gerada por energia solar e utilizam dados de consumo e produção, entre outras coisas, para precificar a eletricidade em um leilão duplo, no qual os vendedores apresentam seus preços e os compradores enviam seus lances ao mesmo tempo. A utilização da tecnologia Blockchain, permite o monitoramento em tempo real do consumo e da produção, e a negociação em tempo real onde terceiros não são necessários. Também tem o potencial de maximizar os lucros na perspectiva dos prossumidores e minimizar as perdas de energia elétrica. Considerando a Finlândia, já possível perceber que os segmentos de clientes estão delimitados em subgrupos dentro das cidades e requer o envolvimento da empresa de eletricidade, a conscientização em nível estatal e inversão em projetos piloto.

Palabras clave: Blockchain, comercio de energía, energía distribuida, solar fotovoltaica.

Abstract

The article proposed a list and discussion of the aspects that should be considered before implementing Blockchain technology in the renewable energy trade. In the proposed model, electricity is generated by solar energy and uses consumption and production data, among other things, to price electricity in a double auction, in which sellers present their prices and buyers send their bids at the same time. The use of Blockchain technology allows real-time monitoring of consumption and production, and real-time trading where third parties are not needed. It also has the potential to maximize profits from the perspective of prossumidor and minimize electricity losses. Considering Finland, it is already possible to realize that customer segments are delimited in subgroups within cities and requires the involvement of the electricity company, awareness at the state level and inversion in pilot projects.

Keywords: Blockchain; energy market; distributed energy; photovoltaic energy

1. Introdução

Os sistemas de energia tradicionalmente se baseiam em sistemas centralizados nos quais a eletricidade é produzida com combustíveis fósseis, o que causa emissões prejudiciais para o clima. Para mudar isto e atingir as metas de emissões líquidas zero, a

participação das fontes renováveis na produção de energia deve aumentar anualmente em quase 12% no mundo [1]. Portanto, essa transição energética e a implementação de usinas de energia renovável exigem uma mudança para o que é conhecido como sistemas de energia distribuídas, os quais são descentralizados,

mais flexíveis e criam uma conexão entre produtores e consumidores [2].

Para reduzir o uso de combustíveis a tendência na área de mobilidade doméstica é a mudança para veículos híbridos e/ou completamente elétricos, enquanto o transporte de carga e o aquecimento doméstico estão se tornando cada vez mais elétricos. A adoção dessas novas tecnologias exige mais eletricidade durante determinadas horas e resultará em picos mais elevados no consumo de energia, trazendo novos desafios ao sistema de energia centralizado tradicional [3]. Os microgeradores com energia renovável e suas microredes se apresentam como uma opção para superar esse desafio.

Para integrar os novos prossumidores de energia renovável na rede elétrica convencional, é preciso evoluir para um novo estágio, denominado redes inteligentes (*smart grid*). De acordo com o Ref. [4], uma rede inteligente é definida como um sistema elétrico que usa informações, tecnologias de comunicação bidirecional, cibernética e aplicativos inteligentes de software em várias camadas do sistema de energia, desde a geração e armazenamento de eletricidade até os pontos finais do consumo. Estas transformações estão trazendo novas forma de ver o mercado de energia.

O comércio de eletricidade *peer-to-peer* (P2P) permite que os prossumidores e consumidores negociem eletricidade entre si para equilibrar a oferta e a demanda. Por exemplo, quando um usuário instala painéis solares fotovoltaicos (passando a ser denominado como prossumidor), e têm um excesso de eletricidade, ele pode trocá-lo para outros consumidores em troca de benefício financeiro. O comércio de eletricidade P2P conecta essas microredes à rede principal, a fim de permitir a participação das companhias elétricas para equilibrar ainda mais a oferta e a demanda [2]. Essas novas transações do mercado de energia precisam ser seguras, transparentes e eficientes.

A tecnologia Blockchain significa a construção de consenso nas negociações diretamente entre os atores (sem intermediários adicionais) dando transparência e confiança ao sistema, e não é unicamente para a compra e venda de energia. Também é possível aplicar a tecnologia Blockchain ao mapeamento de valores e direitos (transparência de origem e propriedade), entre outras. Os contratos inteligentes, por exemplo, permitem a cooperação e contabilidade de desempenho de sistemas autônomos, e significa rastreabilidade e irreversibilidade na geração de energia renovável. Essa disposição é a base perfeita e proativa para a expansão da rede elétrica inteligente e, portanto, para a interação dos diversos agentes no mercado de eletricidade organizacional e espacialmente descentralizado [6].

Em resumo, contratos inteligentes oferecem enorme potencial de automação para processos e procedimentos de negócios, como os encontrados na indústria de energia, em particular, o setor de comércio de energia P2P. No entanto, a escolha do modelo é crucial. Desde a seleção do tipo de Blockchain, o tamanho da rede de consumidores etc. A Ref. [6], por exemplo apresentou o modelo baseado na rede Ethereum para o caso de estudo em Seattle. Identificando a necessidade da digitalização de sistemas de medição de consumo nas casas, e testando a velocidades das transações. Existem relativamente poucos trabalhos que discutam os modelos de comércio P2P com Blockchain, e de fato, nenhum estudo ainda desenvolveu um modelo de negócios para um comércio de eletricidade P2P na Finlândia.

Este artigo visa discutir a fase inicial para desenvolver um modelo de negócios para um sistema de comercialização de eletricidade P2P, tendo como caso de estudo na Finlândia com base no modelo de negócios da Ref [7]. Desse, forma o objetivo do trabalho é identificar e listar os desafios necessários para que a tecnologia Blockchain possa ser usada para comercializar créditos de energia fotovoltaica entre consumidor, pro-consumidor e empresa de energia.

2. Metodología

Inicialmente foram identificados tipo de tecnologia Blockchain com resultados mais promissores no comércio de eletricidade P2P com base em pesquisas existentes e, em seguida, foram comparados entre si e aplicados neste modelo de negócio.

O modelo de negócio foi construído com base na proposta da Ref. [7] que é dividida em nove seções que são: Atividades-Chave, Parceiros, Recursos, Propostas de Valor, Relacionamento com o Cliente, Estrutura de Custos e Fluxos de Receita. Cada seção foi então avaliada com foco em pesquisas prévias e resultados de projetos piloto.

2.1. Atividades Chaves

Fatores de atividades-chave como a utilização de Blockchain e produção de energia solar fotovoltaica são os principais tópicos a serem considerados.

2.1.1. Utilização de Blockchain

Para um mercado local de energia, uma Blockchain permite o uso de contratos inteligentes e compartilhamento de dados. Com um Blockchain, cada transação pode ser vista a partir do registro, e tudo é transparente. Isso ajuda a trazer mais confiança para o sistema do ponto de vista do usuário.

A Blockchain pode ser de dois tipos: pública ou privada. Uma Blockchain privada permite o uso de um sistema no qual a verificação de qualquer transação acontece por uma operadora particular, e não mantém o sistema aberto para todos, como é no caso de um Blockchain pública. Uma vez que o objetivo do Blockchain, neste contexto, é atender os usuários de uma determinada área geográfica e garantir segurança e transparência, uma Blockchain privada é uma opção mais adequada [8].

Em um sistema de comercialização de eletricidade P2P, a transparência é crucial para que o consumidor veja quanta eletricidade está disponível para comprar e para um prosumidor ver a demanda. Um medidor inteligente torna possível a visualização de dados em tempo real. No caso da *Brooklyn Microgrid*, os dados de consumo e geração são transferidos dos medidores inteligentes *Transactive Grid* dos participantes para suas contas Blockchain [9].

Uma Blockchain também resolve o problema dos contratos na negociação com contratos inteligentes. Um contrato inteligente é um programa que cria um acordo entre os dois pares que fazem a transação. Os contratos inteligentes têm uma vantagem sobre os contratos tradicionais, adicionando mais inteligência ao sistema, substituindo regulamentos e políticas desnecessárias, em aditivos para implementar uma maneira de negociar ativos, neste caso a eletricidade. [10].

Uma Blockchain também é o estabelecedor da moeda usada na negociação de eletricidade P2P. As moedas criptomoedas são baseadas em uma Blockchain, e são a melhor opção como moeda para negociação P2P. O uso de tokens, o aparecimento de uma criptomoeda, em vez de moedas tradicionais como euros na Finlândia, dá um benefício. Para as criptomoedas, as liquidações e transações são instantâneas [6], e intervenções de terceiros não são necessárias, tornando a negociação mais rápida e menos complicada ([11];[12]).

2.1.2. Produção de energia fotovoltaica

Os desafios e oportunidades de produção de energia solar fotovoltaica devem ser avaliados comparando saídas de energia de painéis com diferentes capacidades. O clima e a localização geográfica da Finlândia foram considerados nos desafios. A produção de eletricidade com painéis fotovoltaicos exige radiação solar. Significa que para produzir eletricidade em uma determinada hora do dia, precisa haver alguma luz solar. Embora a Finlândia esteja localizada no Norte e a radiação solar seja relativamente baixa em comparação com países do Sul, alcançar um excedente em um domicílio residencial com fotovoltaica solar é possível mesmo durante certas horas de outubro com capacidade suficiente instalada

de painéis fotovoltaicos [13]. Isso significa que o sistema de comercialização de eletricidade P2P pode ser funcional mesmo durante os meses mais escuros. Ao mesmo tempo, a eficiência energética dos painéis fotovoltaicos está melhorando, o que projeta um bom futuro para os sistemas de comércio energia P2P na Finlândia. O verão na Finlândia é ensolarado e o excedente pode ser alcançado em um dia médio em junho com capacidade fotovoltaica instalada suficiente mesmo das 5:00 às 19:00 [13]. O excedente durante essas horas cria uma excelente base para sistemas de energia descentralizados.

2.2. Parceiros

Os principais parceiros do sistema são formados com base nas atividades-chave. As principais atividades, o uso de Blockchain e a negociação de energia incluem o forte envolvimento de prosumidores e consumidores, o que os torna os principais participantes. Os prosumidores lidam com a geração de energia renovável, razão pela qual eles são uma parte tão vital do sistema.

Os consumidores têm um papel importante na criação da demanda. Sem a demanda criada pelos consumidores e outros prosumidores, os lucros dos prosumidores diminuiriam significativamente devido à estratégia de preços que visa dar aos participantes do sistema incentivo para negociar uns com os outros em vez de comprar eletricidade de uma fonte externa. Por outro lado, sem os prosumidores, o custo da eletricidade para os consumidores aumentaria por causa da estratégia de preços das companhias de energia.

O terceiro sócio, também um estabelecedor do sistema P2P, é a empresa de rede. A oferta cai para zero em determinadas horas, por exemplo, durante aquelas horas em que a radiação solar é muito baixa [13]. Isso leva à situação em que tanto consumidores quanto prosumidores devem comprar sua eletricidade de uma fonte externa, que neste caso é a companhia elétrica. No modelo proposto por [2], a distribuidora, que está neste papel também a companhia elétrica, é uma parte vital do sistema, pois é o estabelecedor do comércio de energia elétrica. Sem a companhia elétrica, não haveria linhas de transmissão para usar e, portanto, nenhuma eletricidade poderia ser comercializada. Se os microgeradores tivesse que partir do zero, nessa situação, novas linhas de transmissão teriam que ser construídas, resultando em um custo muito maior de criação do sistema P2P.

2.3. Recursos

Os Recursos-Chave são as ferramentas e materiais necessários para aplicar as principais atividades do modelo de negócio. Para este procedimento, tudo,

desde a produção de energia elétrica até a distribuição, deve ser considerado, além de pesquisar a tecnologia mais ideal. A maioria dos recursos necessários pode ser vista na Figura 1. Para entrar em detalhes, os recursos necessários são o hardware, o software, a rede de distribuição e os participantes do sistema [14].

Nesse contexto, o hardware pode ser dividido em duas seções, que são físicas e virtuais. O hardware virtual inclui o sistema de gerenciamento de energia. O hardware físico inclui medidores inteligentes e painéis solares fotovoltaicos. O hardware físico permite a geração de eletricidade e com medidores inteligentes a medição tanto do consumo quanto da geração. Painéis solares fotovoltaicos são para prossumidores e são necessários para a geração de eletricidade. O hardware virtual, por outro lado, equilibra a oferta e a demanda usando algoritmos baseados em dados em tempo real do sistema, gerencia o fluxo de energia e executa o software onde as negociações são feitas.

O software é um *marketplace* distribuído que funciona em Blockchain [15]. Como recurso, o software é uma parte significativa do sistema, pois é a plataforma de negociação. Sem ela, a negociação não pode ser feita. Deve ser fácil de usar para atrair novos usuários e fácil de usar para diminuir a barreira de se tornar um participante no sistema. Para o software, a Ref. [15] sugere um aplicativo web, que geralmente, é fácil de usar. O software aproveitará diferentes tipos de algoritmos projetados para a negociação para otimizar

o processo de negociação e maximizar os lucros tanto para prossumidores quanto para consumidores.

A rede de distribuição é composta por linhas de transmissão. Em Figura 1, as linhas de transmissão são ilustradas como linhas entre os domicílios residenciais e como linhas de ruptura entre a rede principal e os domicílios residenciais. Utilizando a infraestrutura já construída, por exemplo, a rede de distribuição já existente é vital [2]. Isso reduz o custo do projeto, pois não há necessidade de construir novas linhas e envolve a empresa de rede para ser uma parte importante do sistema.

2.4. Estrutura de custos

Como o modelo visa oferecer eletricidade mais verde a um preço mais baixo. Devem ser considerados os custos como investimento inicial, os custos da transação na Blockchain e custos de transmissão de energia elétrica

2.4.1. Custo do sistema de geração fotovoltaico

Para uma casa residencial com aquecimento elétrico na Finlândia, para poder produzir um excedente de eletricidade com energia solar fotovoltaica ainda em outubro, seria necessário um sistema fotovoltaico de 19,1kWp. O sistema de 19,1kWp pode produzir um excedente de 48kWh em um dia médio em julho [13]. Devido à alta produção, um sistema de 10kWp também poderia ser ótimo. A ideia em um sistema P2P para um prossumidor não é apenas produzir, mas também

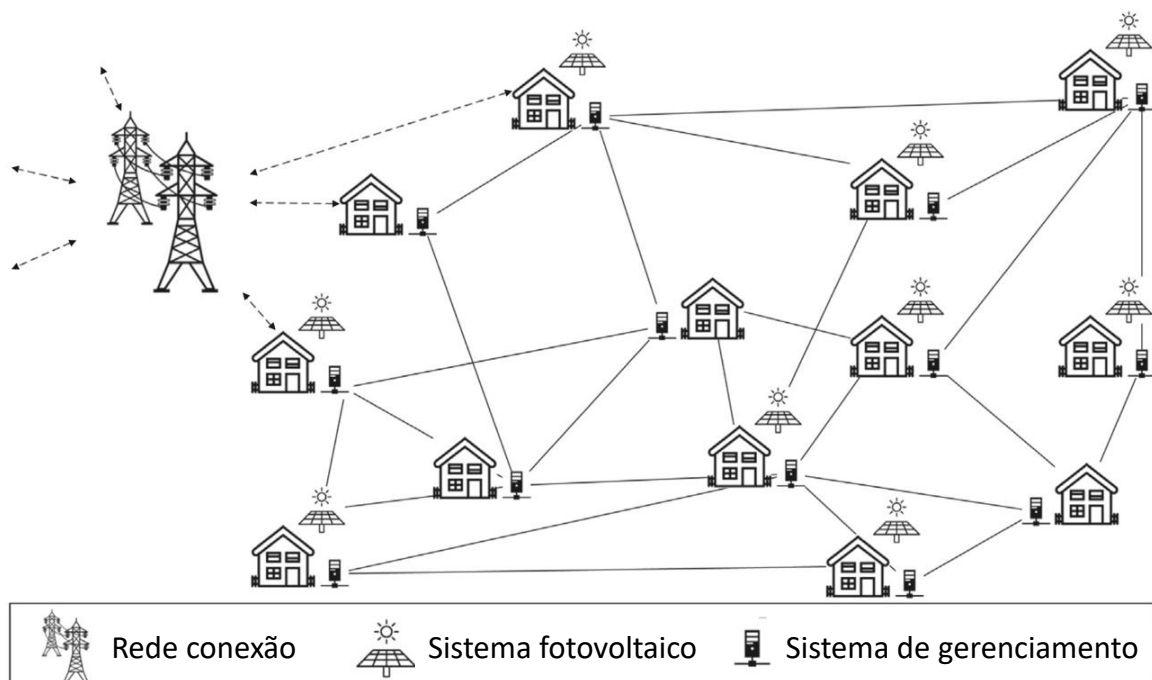


Figura 1. Elementos para uma rede elétrica inteligente com negociações P2P. Fonte: [9].

consumir. Isso significa que qualquer participante do sistema com um painel fotovoltaico também pode consumir. Isso, por outro lado, leva a uma grande variedade de participantes com sistemas fotovoltaicos de diferentes capacidades.

Na simulação do projeto LAMP na Alemanha por [9] 25% dos participantes eram prossumidores e os painéis fotovoltaico eram todos 5kWp, como resultado, notou-se que o sistema P2P não baixou o preço da eletricidade tanto quanto o esperado. Para baixar mais o preço da eletricidade, e para ter um projeto de energia P2P mais bem sucedido, a produção local de energia fotovoltaica deve ser maior.

Para um sistema P2P com 540 participantes, Assumindo que cada prossumidor tem um sistema PV de 10kWp e 50% dos participantes são prossumidores, os custos iniciais relativos às instalações do painel a um preço de 1,2 €/Wp [16], seria de $540 \times 0,5 \times 10\,000 \text{ Wp} \times 1,2 \text{ €/Wp} = 3,2 \text{ M€}$. Para um prossumidor individual, o custo para as instalações dos painéis fotovoltaicos seria de 12 000€. O investimento inicial para um prossumidor é alto, mas deve-se notar que resulta em lucros contínuos com a venda da eletricidade.

2.4.2. Custos das transações na Blockchain

Uma vez que a atividade mais importante do sistema de energia P2P é a negociação, a maioria dos custos vem dele. Todo o sistema funciona em Blockchain, que consome energia, retratado como "gás" para o Ethereum, que forma uma parcela significativa dos custos. Para comparação, as transações com PayPal são duas vezes mais caras em comparação com transações com o Ethereum [17]. O consumo de gás depende do número de participantes no mercado, do mecanismo de negociação e do intervalo de negociação.

A Ref. [8] simulou o consumo de gás para um Ethereum dentro de um mercado energia local com diferentes estruturas de negociação e número de participantes. Um número maior de participantes requer, naturalmente, mais poder de cálculo do sistema que leva em mais gás usado. Além disso, a estrutura de negociação, ou seja, se a negociação é em tempo real ou no dia seguinte, influencia o uso do gás e, portanto, os custos. A negociação no dia seguinte é mais eficiente em termos de gás devido à menor quantidade de informações necessária em comparação com a negociação em tempo real. Na negociação em tempo real, os intervalos de negociação são um fator importante que impulsiona o uso do gás. Quanto mais curtos forem os intervalos, mais gás o comércio usa. Intervalos de negociação de 15 minutos são sugeridos para reduzir os custos de negociação em comparação com o uso de um intervalo de negociação de 5 minutos.

Para calcular os custos de negociação, por exemplo, os custos do consumo de gás, o consumo de gás do mecanismo de negociação deve ser conhecido. Sugere-se um mecanismo de negociação de leilão duplo. Para este mecanismo de negociação, a Ref. [6] calculou que, com 540 participantes, o custo mínimo médio por dia das transações com o preço do Ethereum a US\$ 230 para um consumidor que faz 85 transações é de US\$ 3,94 e para um prossumidor fazendo 96 transações \$4,46 (isto considerando o ano de 2019 em que a pesquisa foi feita).

No entanto, com o preço mais recente em março de 2022 do Ethereum de cerca de US \$ 2900 [18], o custo para um consumidor seria de $2900/230 \times \$3,94 = \$49,7$, e para um prossumidor $2900/230 \times \$4,46 = \$56,2$. É claro que os participantes podem não fazer tantas transações por dia como nesses cálculos.

Ao tornar os intervalos de negociação mais longos, os custos de negociação podem ser reduzidos. Por exemplo, com intervalos de negociação de 30 minutos, os custos de negociação diminuiriam em 50%, porque haveria menos negociações. No entanto, no mecanismo de negociação de leilão duplo que é discutido na Seção **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, os prossumidores pagam o gás para fazer uma oferta e limpar o mercado não requer gás, pois não é computado na Blockchain [6].

2.4.3. Custos da rede elétrica e distribuição

Um fator nos custos que um sistema centralizado tradicional enfrenta, é o custo que a perda de eletricidade com longas linhas de transmissão causa. Com um sistema descentralizado, esses custos são reduzidos, pois a eletricidade geralmente é transportada dentro do sistema local e o algoritmo de negociação favorece linhas de transmissão mais curtas [10]. Embora as perdas e comprimentos de transmissão sejam minimizados, ainda há custos de transmissão que precisam ser gerenciados. A maneira mais simples de cuidar dos custos de transmissão seria incluí-los nos contratos inteligentes para que a transmissão seja paga imediatamente com o pagamento da transação.

2.5. Fluxos de receita

Os fluxos de receita deste modelo foram identificados comparando algoritmos Blockchain uns com os outros e reconhecendo os algoritmos para negociação e gerenciamento de carga e geração que resultam em maiores lucros e menos eletricidade desperdiçada. Na busca do mecanismo de comércio mais ideal, foram avaliados fatores como consumo de gás, intervalos de negociação e custo da eletricidade. O mecanismo de negociação foi então escolhido com base na avaliação. A necessidade de um algoritmo Blockchain para gerenciamento de carga e geração foi reconhecida pela

identificação dos desafios de picos elevados de demanda e oferta em um sistema elétrico P2P.

Figura 2 mostra a estrutura do quadro de leilões duplos. Além de ser completamente automatizado e ter um preço de compensação de mercado que conecta oferta e demanda, também é rentável, o que é naturalmente importante para os consumidores. Um mecanismo de leilão duplo também é seguro, e o nível de descentralização é o mais alto. Em comparação com o HTBS (Hyperledger Fabric baseado em licitação e negociação hierárquica) introduzido por Ref. [19], o quadro de leilões duplos da Ref. [6] cria mais receita em comparação com uma rede elétrica tradicional. Assim, o mecanismo de negociação de leilões duplos é a opção mais adequada para este projeto.

Para otimizar o processo de negociação, algoritmos Blockchain são necessários. Eles também são necessários para automatizar o processo, uma vez que os usuários do sistema provavelmente não estão dispostos a monitorar seus dispositivos 24h por dia e fazer a negociação manualmente. A Ref. [11] propõe algoritmos simples para prossumidores e consumidores que visam fazer transações equilibradas e automatizadas com contratos inteligentes sem a necessidade de os usuários intervirem. No algoritmo proposto, o sistema verifica a geração e a demanda dos prossumidores, procedendo então para vender ao primeiro comprador. Este algoritmo é uma opção adequada para um sistema P2P, porém não permite, preços em tempo real. Pelo contrário, baseia-se em um preço unitário comumente acordado entre prossumidores e consumidores. Na mudança do sistema centralizado tradicional, onde um preço fixo para a eletricidade é usado se desejado, esse tipo de preço unitário fixo poderia trazer mais estabilidade e

confiança ao sistema, pois já é um mecanismo de preços familiar para as pessoas físicas.

No entanto, um preço unitário fixo comumente acordado pode não ser a melhor opção, porque não é flexível. No estudo realizado por a Ref. [20] um modelo de tecnologia Blockchain com resposta à demanda baseada em preço em tempo real é aplicado a um estudo de caso no Vietnã. Os resultados indicam que a satisfação do cliente e a rentabilidade aumentam enquanto os impactos ambientais são reduzidos. O desempenho foi mais de três vezes maior em comparação com um sistema que não usa blockchain.

2.6. Propostas de valor

O processo de encontrar as propostas de valor focou fortemente no desenvolvimento de um Modelo de Negócio que cumpra os requisitos futuros das emissões de CO₂ na produção de energia. Outras propostas foram descobertas comparando os preços da eletricidade em uma rede elétrica P2P a uma rede elétrica centralizada. Um valor agregado que o sistema P2P oferece é a redução de preço. O preço da eletricidade do sistema P2P é inferior ao preço de varejo da rede principal [21]. Isso resultará na satisfação do cliente. Além disso, a Ref. [21] mostrou que o custo externo da eletricidade é menor com um mercado de energia local. As propostas de valor para os participantes são, portanto, preços mais baixos e menores custos de energia elétrica.

Um valor que é adicionado aos prossumidores é o lucro da negociação de energia para os pares. Como os lucros permanecem na comunidade em vez de ir para um sistema centralizado, a aprovação da comunidade é maior. O sistema P2P agrega sustentabilidade além de

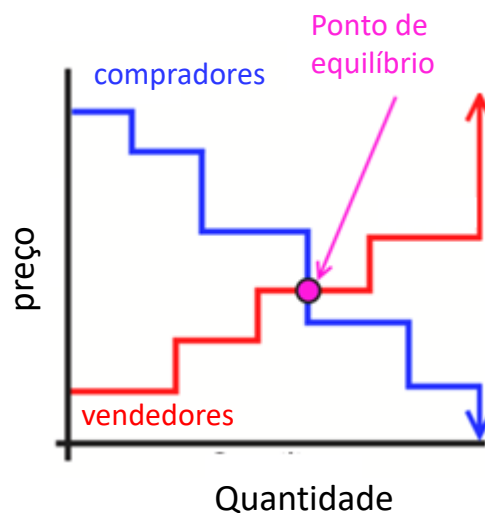


Figura 2. Preço de compensação de mercado com mecanismo de negociação de leilão duplo. Fonte:[6].

apenas criar valor financeiro aos seus usuários. O sistema P2P de resposta à demanda descentralizada reduz os impactos ambientais, bem como agrega sustentabilidade em relação à economia, meio ambiente e sociedade [20].

2.7. Clientes

Projetos piloto anteriores de redes elétricas P2P foram examinados cuidadosamente para identificar os segmentos de clientes necessários. Os resultados desses projetos ajudaram também na identificação do Relacionamento com o Cliente que esse modelo cria. O sistema P2P foi considerado a partir do aspecto de produção, comercialização, distribuição e consumo de eletricidade. Com base nessas atividades, as partes necessárias para a execução do sistema foram reconhecidas resultando nos clientes desse modelo.

Os prossumidores podem então ser divididos em diferentes segmentos pela forma de construção residencial. Os edifícios de apartamentos podem se tornar prossumidores instalando painéis fotovoltaicos em seus telhados. Dessa forma, o investimento inicial pode ser dividido pelo número de apartamentos. Casas isoladas são um dos principais segmentos de clientes do sistema P2P. Eles podem ser prossumidores simplesmente instalando painéis fotovoltaicos em seus telhados e facilmente gerar um excedente de eletricidade mesmo sem ter capacidade instalada de 19,1kWp, como mostrado por [13].

3. Resultados e discussão

Os resultados desta pesquisa mostram as principais considerações para um sistema de negociação de eletricidade P2P baseado em Blockchain na Finlândia. A pesquisa também mostra que esse sistema pode baixar o preço da eletricidade para os consumidores e, ao mesmo tempo, aumentar os benefícios para os prossumidores. O sistema aumenta a quantidade de energia renovável focando apenas na produção de eletricidade com energia solar fotovoltaica. O resultado desta pesquisa deve ser visto como uma diretriz, ou uma estrutura usada na implementação de um sistema de comercialização de eletricidade P2P. A contribuição que esta pesquisa cria é que ela conecta energia renovável e tecnologia Blockchain para construir um modelo de negócios para o comércio de eletricidade P2P.

Em relação ao tipo de tecnologia Blockchain usada no sistema de energia P2P, descobriu-se que uma Blockchain privada é a opção mais adequada devido ao estreitamento geográfico dos participantes. Para validação de novos blocos, o mecanismo de consenso Proof-of-Authority (PoA) foi descoberto como a melhor opção porque permite que o sistema use menos energia com a aleatoriedade na seleção de validadores.

A tecnologia Blockchain aumenta a transparência no sistema. Novos blocos na cadeia são para todos os participantes verem. Os dados de geração também são para todos verem para que os preços possam ser computados corretamente. Além disso, a tecnologia Blockchain foi encontrada para aumentar a segurança. Para que um novo bloco seja adicionado à cadeia, ele deve ser validado com o mecanismo de consenso PoA e blocos já adicionados não podem ser alterados.

A pesquisa também mostra que o sistema funciona a partir do aspecto de um prossumidor porque um excedente de eletricidade é alcançável mesmo na Finlândia. Os resultados mostram que, para um único prossumidor, o custo estimado das instalações necessárias para o painel seria de cerca de 12.000 €. Claro, isso é apenas para um prossumidor médio, o que significa que se tornar um prossumidor é possível mesmo com um investimento inicial menor. Descobriu-se que o uso de pagamentos mensais de usuários é sugerido para cobrir os custos de manutenção e operação neste sistema.

A tecnologia Blockchain reduziu os custos de negociação excluindo terceiros. Os custos diários de negociação no sistema foram encontrados em US\$ 49,7 para os consumidores e US\$ 56,2 para os prossumidores. No entanto, ao otimizar o mecanismo de negociação e aumentando os intervalos de negociação, verificou-se que os custos de negociação cairiam. Para que o mecanismo de negociação fosse usado no modelo, um mecanismo de negociação de ação dupla foi descoberto como a opção mais ideal. O mecanismo foi encontrado para criar mais receita em comparação com outros mecanismos e foi encontrado como um dos mais descentralizados. O mecanismo de leilão duplo permite a implementação de um sistema de negociação P2P eficiente, pois é automatizado, e encontra o preço de mercado onde a demanda e a oferta atendem. Um sistema hierárquico de negociação e licitação também foi identificado como uma escolha adequada.

Para implementar o sistema P2P, os segmentos discutidos nesta tese devem ser classificados. Figura 3 mostra o modelo de negócio proposto para um sistema de comercialização de eletricidade P2P na Finlândia. Os principais parceiros, consumidores, prossumidores e a empresa da rede devem estar envolvidos. Encontrar consumidores e prossumidores é fácil, pois o incentivo financeiro para participar do sistema deve motivar os usuários a aderir. No entanto, envolver a empresa de rede para o projeto pode precisar de alguma negociação, por exemplo, decidir qual é a taxa de uso de suas linhas de transmissão. Os recursos-chave também são vitais para o sistema. Sem eles, o sistema não pode funcionar. O hardware físico é relativamente fácil de obter, pois só precisa de dinheiro. No entanto, a implementação do hardware virtual e do software

Participantes <ul style="list-style-type: none"> • Consumidores • Prossumidores • Companhia de energia 	Atividade chave <ul style="list-style-type: none"> • Negociações de energia • Uso da Blockchain • Produção Solar 	Valor agregado <ul style="list-style-type: none"> • Energia renováveis • Custos e eficiência • Lucro para os prossumidores • Baixo custo de energia elétrica 	Relações entre clientes <ul style="list-style-type: none"> • Segmentos entre bairros
	Recursos chave <ul style="list-style-type: none"> • Software para negociações • Painéis fotovoltaicos • Medidores inteligentes • Blockchain • Linhas de transmissão 		Canais de comunicação <ul style="list-style-type: none"> • Software para negociações
Estrutura de custos <ul style="list-style-type: none"> • Custo do sistema fotovoltaico • Custas das transações na blockchain • Custos de distribuição 		Fluxos de receita <ul style="list-style-type: none"> • Mecanismo de negociação (leilão duplo) • Algoritmos de gerenciamento na geração e o consumo de energia elétrica 	

Figura 3. modelo de negócio para negociação de eletricidade P2P na Finlândia. Fonte: elaboração própria

para negociação pode levar tempo, já que o sistema deve funcionar corretamente antes do lançamento. Isso porque erros no sistema podem levar à falta de eletricidade para alguns participantes.

4. Conclusiones

Esta pesquisa teve como objetivo desenvolver um modelo de negócios para um modelo de comercialização de eletricidade P2P na Finlândia. Como não há nenhuma pesquisa prévia para esta área que abrange o comércio de eletricidade P2P na Finlândia, este artigo de pesquisa reuniu pesquisas existentes sobre o comércio de eletricidade usando a tecnologia Blockchain.

Foram identificados desafios dos sistemas de energia descentralizados e da necessidade de mais energia renovável e reconhecida a demanda por um modelo de negócio para um sistema de energia descentralizado. Com base em resultados promissores com a tecnologia Blockchain e sistemas de energia distribuída, notou-se que um modelo de negócios para negociação de eletricidade P2P é exigido.

Algoritmos Blockchain são cruciais para o funcionamento deste sistema. Os sistemas visam ser totalmente automatizados em que os algoritmos são importantes. Eles são necessários para calcular o preço, para executar as negociações e para controlar a geração e a carga. Também foi descoberto que o uso de um algoritmo Blockchain para controlar a geração e gerenciar a carga é sugerido. Devido à variação do clima e picos no consumo de eletricidade, tal algoritmo é necessário. A gestão de carga e geração foi encontrada para aumentar os lucros dos prossumidores e dos consumidores, reduzindo a energia desperdiçada. A pesquisa mostra que um sistema de comercialização de eletricidade P2P oferece alto valor aos seus participantes. O sistema dá poder a todas as partes,

dando aos consumidores típicos a chance de se tornarem prossumidores. Reduz a barreira entre prossumidores e consumidores, tornando fácil e viável se tornar um prossumidor. O sistema também mostrou ter valor em dar aos seus participantes uma redução no preço da energia elétrica. Isso, por outro lado, aumenta a satisfação do cliente.

5. Agradecimientos

Os autores expressam os agradecimentos à FAPEMIG - Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais, ao CNPq - Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, à CAPES - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior pelos apoios financeiros nesta pesquisa.

6. Referencias

- [1] IEA. (2021). Renewable Power. IEA, Paris. <https://www.iea.org/reports/renewable-power>
- [2] Soto, E. A., Bosman, L. B., Wollefa, E., & Leon-Salas, W. D. (2021). Peer-to-peer energy trading: A review of the literature. *Applied Energy*, 283, 9. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.116268>
- [3] Liu, C., Chai, K. K., Zhang, X., & Chen, Y. (2021). Peer-to-peer electricity trading system: smart contracts based proof-of-benefit consensus protocol. *Wireless Networks*, 27(6), 4217-4228. <https://doi.org/10.1007/s11276-019-01949-0>
- [4] Gharavi, H., & Ghafurian, R. (Eds.). (2011). Smart grid: The electric energy system of the future (Vol. 99, pp. 917-921). Piscataway, NJ, USA: IEEE.
- [5] Teufel, B., Sentic, A., & Barmet, M. (2019). Blockchain energy: Blockchain in future energy

- systems. *Journal of Electronic Science and Technology*, 17(4), 100011.
- [6] Foti, M., & Vavalis, M. (2019). Blockchain based uniform price double auctions for energy markets. *Applied Energy*, 254, 11, Article 113604. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113604>
- [7] Osterwalder, A., & Yves, P. (2010). *Business model generation: a handbook for visionaries, game changers, and challengers* (Vol. 1). John Wiley & Sons.
- [8] Blom, F., & Farahmand, H. (2018). On the Scalability of Blockchain-Supported
- [9] Mengelkamp, E., Gärtner, J., Rock, K., Kessler, S., Orsini, L., & Weinhardt, C. (2018a). Designing microgrid energy markets A case study: The Brooklyn Microgrid. *Applied Energy*, 210, 870-880. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.06.054>
- [10] Thukral, M. K. (2021). Emergence of blockchain-technology application in peer-to-peer electrical-energy trading: a review. *Clean Energy*, 104-123. <https://doi.org/10.1093/ce/zkaa033>
- [11] Chowdhury, N.-U.-R., Islam, K., & Hasan, F. (2019). An Efficient Algorithm for Peer-to-Peer Energy Trading Using Blockchain in Microgrid Energy Markets. *EJECE, European Journal of Electrical and Computer Engineering*, 3(3), 5. <https://doi.org/10.24018/ejece.2019.3.3.80>
- [12] Li, Y., Yang, W., He, P., Chen, C., & Wang, X. (2019). Design and management of a distributed hybrid energy system through smart contract and blockchain. *Applied Energy*, 248, 390-405. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.04.132>
- [13] Simola, A., Kosonen, A., Ahonen, T., Ahola, J., Korhonen, M., & Hannula, T. (2018). Optimal dimensioning of a solar PV plant with measured electrical load curves in Finland. *Solar Energy*, 170, 113-123. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.05.058>
- [14] IRENA. (2020). Innovation landscape brief: Peer-to-peer electricity trading. International Energy Agency.
- [15] Kabi, O. R., & Franqueira, N. L. (2019). Blockchain-Based Distributed Marketplace. *BIS 2018: Business Information Systems Workshops*, 197-210. https://doi.org/10.1007/978-3-030-04849-5_17
- [16] Motiva. (2021). Aurinkosähköjärjestelmien hinta. Retrieved 21.3.2022 from https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/aurinkosahko/jarjestelman_valinta/aurinkosahkojarjestelmien_hinta
- [17] Albrecht, S., Reichert, S., Schmid, J., Strüker, J., Neumann, D., & Fridgen, G. (2019). Dynamics of Blockchain Implementation – A Case Study from the Energy Sector. *Proceedings of the 51st Hawaii International Conference on System Sciences*, 3527-3536. <http://hdl.handle.net/10125/50334>
- [18] CoinMarketCap. (2022). Ethereum. Retrieved 21.2.2022 from <https://coinmarketcap.com/currencies/ethereum/>
- [19] Yu, Y., Guo, Y., Min, W., & Zeng, F. (2019). Trusted Transactions in Micro-Grid Based on Blockchain. *Energies*, 12(10), 16. <https://doi.org/10.3390/en12101952>
- [20] Tsao, Y.-C., Thanh, V.-V., & Wu, Q. (2021). Sustainable microgrid design considering blockchain technology for real time price-based demand response programs. *Electrical Power and Energy Systems*, 125, 14, Article 106418. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2020.106418>
- [21] Christidis, K., Sikeridis, D., Wang, Y., & Devetsikiotis, M. (2021). A framework for designing and evaluating realistic blockchain-based local energy markets. *Applied Energy*, 281, 17, Article 115963. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115963>