LUCAS BERBEKA CLETO

OPERAÇÃO DE FONTES DE ENERGIA RENOVÁVEIS NO MERCADO VAREJISTA BASEADA EM TECNOLOGIA BLOCKCHAIN

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica, Área de Concentração em Sistemas de Energia, Departamento de Engenharia Elétrica, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como parte das exigências para a obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Rasi Aoki
Coorientador:M.Sc. Kristie Kaminski Küster

CURITIBA
2019

TERMO DE APROVAÇÃO

LUCAS BERBEKA CLETO

OPERAÇÃO DE FONTES DE ENERGIA RENOVÁVEIS NO MERCADO VAREJISTA BASEADA EM TECNOLOGIA BLOCKCHAIN

Trabalho de Conclusão de Curso aprovado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica, Curso de Graduação em Engenharia Elétrica, Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná, pela seguinte banca examinadora:

_____

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Rasi Aoki

Departamento de Engenharia Elétrica, UFPR

_____

Prof. Dr. Ewaldo Luiz de Mattos Mehl

Departamento de Engenharia Elétrica, UFPR

_____

Dra. Theoma Otobo

Departamento de Engenharia Elétrica, UFPR

Curitiba, 25 de Junho de 2019

RESUMO

A necessidade de um sistema descentralizado e mais barato se faz cada vez mais necessário tendo como possibilidade o mercado livre de energia, mas deve-se ir além. O mercado varejista de energia tem se mostrado promissor para uma melhor negociação entre usuários cadastrados, porém as regras são difíceis de serem cumpridas para o consumidor comum. Neste trabalho, utilizando um sistema de 13-barras é simulado via o software GridLAB-D a conexão de fontes renováveis com o sistema e utilizando a tecnologia Blockchain se faz possível uma negociação segura desses excedentes de energia de maneira fácil e sem intermediários.

Palavras-chave: Blockchain. Mercado Varejista de Energia. Descentralização

ABSTRACT

The need for a decentralized and cheaper system becomes more and more necessary with the free energy market as a possibility, but one must go further. The retail energy market has shown promise for better negotiation among registered users, but the rules are difficult to meet for the average consumer. In this work, using a 13-bar system is simulated via the software GridLAB-D the connection of renewable sources with the system and using Blockchain technology makes it possible to safely negotiate these surplus energy easily and without intermediaries.

Key words: Retail Electricity Market. Blockchain. Decentralization.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 – Estratégia de coleta e análise de artigos científicos.....24
FIGURA 2 – Diagrama unifilar do caso teste de 13 barras 31
FIGURA 3 – Curva de Carga da Barra 675.....39
FIGURA 4 – Curva de Carga da Barra 645.....40
FIGURA 5 – Curva de Carga da Barra 634.....40
FIGURA 6 – Painel Solar no barramento 645 42
FIGURA 7 – Unidade Eólica no barramento 634.....42

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – Combinação de palavras-chave 23
TABELA 2 – Portofólio dos artigos selecionados 25
TABELA 3 – Indicadores Bibliométricos do Portfolio.....26
TABELA 4 – Pontos-chaves dos artigos 28
TABELA 5 – Distribuição das cargas instaladas entre as barras 32
TABELA 6 – Dados das linhas de energia 33
TABELA 7 – Dados do Regulador de Tensão.....34
TABELA 8 – Dados do Transformador.....34
TABELA 9 – Dados dos Cpacitores 34
TABELA 10 – Curva de Carga e FP.....38

LISTA DE SIGLAS

EE - Energia elétrica

CCEE - Câmara de Comercialização de Energia Elétrica

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica

GD - Geração Distribuída

PoS - Proof of Stake

PoW - Proof of Work

REN - Resolução Normativa

CV - Comercializador Varejista

ACL - Ambiente de Contratação Livre

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 12
1.2 OBJETIVOS 13
1.3 JUSTIFICATIVA 14
1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO 14
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA 15
2.1 BLOCKCHAIN 15
2.1.1 Histórico 15
2.1.2 Criptografia 16
2.1.2.1 Funções Hash 16
2.1.2.2 Hash Pointer e Estruturas de Dados 16
2.1.2.3 Assinaturas Digitais 17
2.1.3 Descentralização 17
2.1.3.1 Protocolo de Consenso Distruibuido 18
2.1.3.2 Manutenção da Integridade dos Blocos 18
2.1.3.3 Blocos e Minerações 19
2.1.4 Contratos Inteligentes 19
2.1.5 Aplicações de Blockchain 19
2.2 Mercado Varejista de Energia 20
2.2.1 Regulamentação 20
2.2.2 Comercializador Varejista 20
2.3 Considerações Finais do Capítulo 22
3 REVISÃO DA LITERATURA E TECNOLOGIA 23
3.1 REVISÃO DE LITERATURA 23
3.1.1 Processo de selção de portofólio bibliográfico 23
3.2 Análise de Literatura 26
3.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO 28
4 MATERIAL E MÉTODOS 29

4.1 MATERIAL 29
4.1.1 GridLAB-D 29
4.1.2 ALIMENTADOR DE TESTE 31
4.1.3 Curvas de Carga.....35
4.2 MÉTODOS.....35
4.2.1 Primeiro caso - Curvas de Carga.....35
4.2.2 Segundo Caso caso - Placares Solares e Energia Eólica.....36
4.2.3 Terceiro caso - Aplicação do Blockchain.....36
5 ANÁLISE DOS RESULTADOS E DISCUSSÃO.....37
5.1 Resultados – Curvas de Carga 37
5.2 Resultados – Placas Solares e Energia Eólica.....41
5.3 Resultados – Aplicação do Blockchain.....43
6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.....44
7 REFERÊNCIAS.....45

1 INTRODUÇÃO

A comercialização de Energia Elétrica (EE) ocupa função estratégica no atual modelo setorial brasileiro [CCEE, 2019]. Esta afirmação é uma das bases que guiam as diretrizes que vem sendo aperfeiçoadas ao longo dos anos no mercado de EE. Podemos citar o Projeto de Reestruturação do Setor Elétrico Brasileiro (Projeto RE-SEB), desenvolvido no final dos anos 90, como um marco na história e que teve como principais conclusões a necessidade de terceirização das empresas de EE.

O incentivo a competição na geração e comercialização e a continuidade de regulação dos setores de distribuição e transmissão de EE, considerados como monopólios naturais pelo Estado brasileiro [CCEE, 2019]. A cada momento aparecem novas propostas de se fazer as mesmas coisas de formas alternativas, de se criar oportunidades que visem agregar a participação das minorias e de se alterar o status quo do mercado. Com a EE não será diferente, mesmo sendo uma área tão conservadora e um sistema que impede alterações rápidas e complexas. O sistema elétrico vem sendo considerado a maior e mais complexa máquina já construída [Gellings, 2009]. As transformações já são discutidas em vários lugares no mundo, baseados nas oportunidades advindas com o desenvolvimento da tecnologia, principalmente, no contexto das redes de pequeno porte, do inglês (*microgrid)* [Jiayi et al., 2008]. Uma dessas novas abordagens tecnológicas, o blockchain, tem o potencial para mudar drasticamente o modo de interagirmos com qualquer tipo de instituição, tendo o potencial de abranger desde negociações econômicas até pagamento de contas e confecções de contratos. O blockchain nada mais é do que um banco de dados ou registro, público e distribuído, surgindo no contexto da criptomoeda Bitcoin para o armazenamento de transações monetárias. Sendo o seu baixo custo operacional e praticidade um forte motivo para se ter expectativas otimistas, pois o blockchain apresenta diversas possibilidades de aplicação tanto no mercado privado como também no mercado público, situação essa que já ocorre em diversas partes no mundo como na Alemanha e Estados Unidos. De acordo com a ANEEL, o Serviço Energia Elétrica é essencial no dia a dia da sociedade, seja nas residências ou nos diversos segmentos da economia, mas para o uso desse bem é necessária a aplicação de tarifas que remunerem o serviço de forma adequada, que viabilize a estrutura para manter o serviço com qualidade e que crie incentivos para

eficiência. Quando cenários comunitários são colocados em pauta (tais como condomínios fechados, comunidades isoladas e cidades privadas), surge a possibilidade de utilizar a energia elétrica excedente para distintos propósitos(GABRICH; COELHO; COELHO, 2017), além da busca em otimizar o arrecadação monetário. Com as tecnologias de Geração Distribuída (GD) surgem novos problemas como a otimização da geração em pequenas comunidades autossustentáveis, levando em consideração os custos de geração e distribuição de energia, bem como balanceamento da rede. Unindo estas tecnologias ao armazenamento de dados via blockchain é possível assegurar transações confiáveis de compra/venda/doação de energia entre membros de uma comunidade, condomínio, bairro, ou até países diferentes. Estas transações têm potencial de democratizar o acesso à energia elétrica, seja reduzindo tarifas, seja criando um novo mercado à medida que indivíduos possam participar livremente.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho consiste em desenvolver um modelo computacional utilizando tecnologia Blockchain para realizar operações no mercado varejista de energia

Por sua vez, os objetivos específicos consistem em:

1. Avaliar ferramentas de plataforma Blockchain;
2. Analisar o estado da arte de aplicações de Blockchain com fontes renováveis de energia no mercado varejista;
3. Modelar a aplicação do sistema em situações simuladas;
4. Testar e validar o modelo simulado em situações diferentes para ver as devidas respostas dos sistemas.

1.3 JUSTIFICATIVA

A aplicação de contratos inteligentes no mercado varejista de energia elétrica utilizando uma plataforma Blockchain para negociação de EE é recente tendo um grande crescimento de artigos e projetos pilotos que visam a implementação desse sistema em cidades de pequeno, médio e grande porte ao redor do mundo assim fazendo necessário um maior estudo dos melhores métodos de se confeccionar e implementar esse sistema. Nesse projeto será modelado um sistema capaz de reproduzir a comercialização de energia de uma região com a finalidade de provar a redução do custo de negociação da energia entre consumidores e produtores como também a descentralização das regiões geradoras de energia.

1.4 ESTRUTURA DA MONOGRAFIA

Este documento está divido em seis capítulos. O capítulo 1, “Introdução”, apresenta a proposta do trabalho, da mesma forma que os seus objetivos gerais e específicos a serem alcançados e justificativa para a realização do mesmo. No capítulo 2,” Fundamentação Teórica”, fornece a fundamentação teórica para o desenvolvimento do trabalho, descrevendo o procedimento de uma plataforma Blockchain, seus contratos inteligentes, sistemas de segurança e aplicações, da mesma forma é apresentado ao Mercado Varejista de Energia Elétrica, sua regulamentação e implementação. No capítulo 3, “Revisão da Literatura”, são explicados o passo-a-passo para a realização da busca dos artigos científicos relevantes e posteriormente breves resumos de cada um dos artigos selecionados.

O capítulo 4, “Materiais e Métodos”, descreve o uso da plataforma Etherium que tem como base a linguagem de programação Python para a implementação das negociações no mercado varejista de energia que utilizará o software Gridlab-D para modelar o sistema de 13 barras e incluir os sistemas de energias renováveis. O capítulo 5, “Análise de Resultados de Discussão”, apresenta as simulações realizadas e os comparativos realizados com os outros cenários. O capítulo 6, “Conclusões e Trabalhos Futuros”, apresenta as considerações finais e sugestões para trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Blockchain

Blockchain tem como princípio fundamental a descentralização como medida de segurança usando a tecnologia de registro distribuído.

O conceito por trás do Blockchain é equivalente a um livro-razão, só que funcionaria de forma pública, compartilhada e universal possibilitando uma maior confiança entre as partes negociantes dispensando a necessidade de um intermediador.

2.1.1 Histórico

O blockchain está intrinsicamente conectado a história do bitcoin, pois o primeiro conceito público de blockchain surgiu em meados de 2008, em um artigo acadêmico intitulado: “Bitcoin: um sistema financeiro eletrônico peer-to-peer”, publicado sob o pseudônimo de Satoshi Nakamoto, nunca se soube se isso foi trabalho de uma pessoa, um grupo ou um empresa.

Sendo que essa tecnologia surgiu em pleno cenário de crise econômica mundial e bolha imobiliária americana, veio com o objetivo de impedir o gasto duplo dos valores e elevar os níveis de segurança das transações financeiras, transferindo tudo para o meio virtual.

Como o bitcoin é uma moeda exclusivamente virtual, sua forma de guardar é diferente das convencionais, o seu valor fica armazenado no HD da pessoa que o tem em posse, sendo que a perda dele do armazenamento resultaria na perda real do bitcoin.

Outro aspecto que diferencia esses métodos dos demais é que essa criptomoeda é descentralizada, ou seja, nenhum banco, empresa ou o próprio governo tem vínculo com a mesma. Como esse sistema foi pensado para ser uma economia alternativa, todas as operações que ocorrem são controladas e verificadas pelos próprios usuários.

2.1.2 Criptografia

A criptografia tem como base a construção de técnicas ou análise de protocolos com o objetivo de impedir terceiros, ou pessoas as quais não sejam o destinatário de receber e interagir com as informações particulares.

2.1.2.1 Funções Hash

Em base, a função *hash* é um algoritmo complexo, que necessita de um computador bastante potente para conseguir resolve-lo. Em resumo, a função *hash* é utilizada durante a mineração. E ela vai converter uma quantidade enorme de informações em uma sequência de números.

Nela temos algo chamado de resumo da mensagem ou impressão digital. Esse é um acontecimento para não ocorrer alterações na sequência de caracteres. Uma forma fácil de encontrar uma alteração na entrada é comparar o resumo com versões anteriores. Se houver uma combinação entre elas, você encontra legitimidade.

Isso torna as *hashs* únicas. Chega a ser considerado praticamente impossível descobrir a entrada.

2.1.2.2 Hash Pointer e Estruturas de Dados

Os ponteiros são artifícios utilizados em linguagem de programação para guardar o endereço de um dado. Tendo a capacidade informar o conteúdo e a localização do mesmo. Já no blockchain, temos dois possíveis tipos de *hash pointers*: um que seria ponteiro ao qual indicaria a localização e o número de hash do bloco imediatamente anterior, e o ponteiro das transações contidas no mesmo bloco. Esse último aponta para o bloco que contém a transação anterior, do local que deriva aquela quantia de Bitcoins. Assim, todas as informações da moeda, naquela transação em particular, ficam registrado na rede. Portanto, independente de qual bloco anterior tenha vindo, o *hash pointer* da transação informa de onde se originou aquelas moedas negociadas neste bloco. Isso significa que é possível saber a origem do bitcoin e em quais negociações ele passou.

Esse modelo de organizar os dados garante a segurança do sistema, impedindo alterações no bloco. Trocar um bloco por outro, ou substituir uma informação dentro do bloco, gera um número de *hash* diferente daquele mostrado pelo bloco seguinte. Logo, para que esse ataque tenha sucesso, se faria necessário mudar todos os blocos posteriores. Se essa substituição não acontecer, o próximo bloco identifica que o número de *hash* está diferente do que aquele armazenado. Em suma, o blockchain nada mais é do que uma estrutura de blocos conectados por *hash* pointers, que guardam a localização e o número de *hash* do bloco anterior.

2.1.2.3 Assinaturas Digitais

As assinaturas digitais devem atender os mesmos requisitos de assinaturas manuais em documentos. Assim, somente o usuário orginal pode assinar um documento, mas, qualquer um pode verificar a sua autenticidade. Além disso, não é possível falsificar a sua assinatura, de tal forma a reutilizá-la em algum outro contexto. Ou seja, assinaturas devem ser únicas.

As assinaturas digitais são executas utilizando criptografia de chave assimétrica. Na situação em questão, além da chave privada ou secreta (sk) usada para assinar os documentos, também será utilizada uma chave pública (pk). A chave privada é secreta e não deve ser revelada para ninguém. Já a chave pública estará disponível para qualquer usuário que deseje atestar a autenticidade da negociação.

2.1.3 Descentralização

Criando confiança sem a necessidade de um usuário intermediário confiável, acredita-se que o Blockchain irá incentivar a revisão dos sistemas de nuvem atuais e auxiliará a implementação correta de sistemas em névoa através de soluções autônomas e descentralizadas.

Possibilita assim como por exemplo do setor de energia, uma maior independência das regiões de uma cidade ou de um país da produção de energia de somente uma região, reduzindo os riscos de possíveis “apagões” de grande porte e diminuindo o custo da energia em si, pois a produção da mesma é realizada em regiões próximas.

2.1.3.1 Protocolo de Consenso Distribuído (Prova de Participação)

A prova de participação é uma maneira diferente de validar transações e alcançar o consenso distribuído. É um algoritmo com o mesmo objetivo da prova de trabalho, mas o processo para atingir o objetivo tem suas diferenças.

Ao contrário da prova-de-trabalho, onde o algoritmo em trocas de soluções para problemas matemáticos recompensa os minerios com o objetivo de validar transações e criar novos blocos, com a prova de participação, o criador de um novo bloco é escolhido através de um sorteio aleatório. Nesse sistema o potencial criador já deve contar com uma quantia de criptomoedas na rede,quanto maior o seu montante maior a chance de ser o criador escolhido. É necessário alocar uma quantidade de ativos para este processo e caso tente comprometer ou substituir o bloco resultará na perda de seus ativos. Isto em teoria garante a integridade dos participantes.

Isso significa que no sistema PoS(*Proof of Stake)* não há recompensa por bloco criado, portanto, os mineiros recebem as taxas de transação. Esse processo é chamado de bloco forjado e não bloco minado como em PoW.

2.1.3.2 Manutenção da Integridade dos Blocos

Sendo que somente o blockchain não garante a integridade completa do bloco nem da negociação, sendo possível que um usuário malicioso crie uma versão alterada do registro apenas ajustando os *hashes* de todos os blocos subsequentes.

Sendo que para solucionar essa situação, o fundador original, Nakamoto, já tinha pensado e proposto um mecanismo de corrigir isso que seria a prova de trabalho, sendo necessário os próprios usuários para verificarem se o bloco está certo ou não, despendendo poder computacional da máquina de cada um, sendo necessário um poder computacional maior que todos os usuários envolvidos com o bloco para conseguir alterar ele.

2.1.3.3 Blocos e Minerações

Os métodos utilizados para minerar os bitcoins estão atrelados ao mecanismo de segurança da prova de trabalho, que usa poder de processamento para resolver cálculos matemáticos que apresentam sua complexidade para assegurar que o hash criptografado do bloco seja legitimo.

Em troca desse esforço e uso do seu potencial computacional o sistema recompensa o serviço prestado com bitcoins assim efetuando a validação da negociação.

2.1.4 Contratos Inteligentes

O termo contrato inteligente ou "*smart contract*" pode se referir a qualquer contrato que seja capaz de ser executado ou de se fazer cumprir por si só, realizando negociações entre duas ou mais partes, sendo desnecessária a participação de intermediários centralizados.

Nesse sentido, um contrato inteligente nada mais é que um código que pode definir regras estritas e consequências da mesma forma que um documento legal tradicional, estabelecendo os vínculos, benefícios e penalidades que podem ser devidas a qualquer das partes em várias circunstâncias diferentes, provendo assim maior veracidade a negociação.

Neste protocolo de computador auto-executável, diferentemente de um contrato tradicional escrito em linguagem puramente jurídico-legal, um contrato inteligente é capaz de adquirir informações, processá-las e tomar as devidas ações previstas de acordo com as regras do contrato.

2.1.5 Aplicações de Blockchain

As possibilidades de aplicação e uso do blockchain estão muito além dos usos mais comuns como por exemplo as criptomoedas, o blockchain tem plena capacidade de executar qualquer negociação de modo virtual e descentralizado, desde contratos de luz, água como também negociações de alimentos e contratos legais que podem utilizar a junção dessa tecnologia com o contrato inteligente estabelecendo o que é permitido ou não em contrato.

2.2 MERCADO VAREJISTA DE ENERGIA

O mercado varejista de energia tem como principal função, facilitar o comércio no mercado livre de energia, podendo utilizar um mediador que foi regulado no ano de 2015, podendo ser negociado a compra e venda de energia de médio e grande porte desde que siga a lei vigente.

2.2.1 Regulamentação

Buscando o desenvolvimento da GD(Geração Distribuída) de menor porte, a ANEEL promoveu a Consulta Pública nº 15/2010 e a Audiência Pública nº 42/2011 para debater sobre essa modalidade, publicando, em 2012, a REN(Resolução Normativa) 482, estabelecendo as condições gerais para o acesso de micro e mini GD aos sistemas de distribuição de energia elétrica e o sistema de compensação (net metering), instituindo um respaldo legal para esse tipo de empreendimento, buscando criar um ambiente menos complexo que incentive sua expansão (Geraldi, 2013).

2.2.2 Comercializador Varejista

Nos últimos anos, com a publicação da Resolução Normativa nº 570/13 (REN 570), a ANEEL deu origem a figura do CV(Comercializador Varejista), estabelecendo requisitos e solicitações para a sua operação no mercado, o qual poderá representar os seguintes agentes:

a) Consumidores livres ou potencialmente livres e especiais;

b) Detentores de concessão, autorização ou registro de geração com capacidade instalada inferior a 50 MW, não comprometidos com CCEARs, Contratos de Energia de Reserva – CER – ou cotas;

c) Geradores com capacidade instalada igual ou superior a 50 MW, contudo é obrigatório que seja associado à CCEE e assumam responsabilidade solidária e proporcional em relação ao resultado financeiro do varejista.

O CV pode ser considerado uma espécie de ponte entre o vendedor de energia incentivada e os consumidores especiais, assumindo as responsabilidades perante a CCEE e as instituições do mercado livre, viabilizando a expansão da oferta com energias renováveis por meio de geradores de pequeno porte.

Ainda oferece liquidez ao mercado, aumentando a competição no mercado varejista, ao reduzir barreiras e a complexidade de adesão de pequenos geradores e consumidores que não conseguem atender às regras por não possuírem equipe

especializada em comercialização de energia elétrica, facilitando o desenvolvimento do mercado livre.

Salienta-se que, com os geradores incentivados e consumidores especiais negociando diretamente no ACL, ocorre um aumento significativo de operações na CCEE e também nos custos de transação, problemas estes mitigados com a atuação do CV como intermediário.

Segundo a REN 570, alterada pela REN 654/15 e os Procedimentos de Comercialização (PdCs) – Submódulo 1.6 – Comercialização Varejista, para ser um CV, é necessário atender a alguns requisitos (ANEEL, 2013):

a) Ser agente da CCEE na classe de comercialização ou categoria de geração;

b) Ter designação específica em seu objeto social para exercer tal atividade;

c) Apresentar em site os produtos padronizados ofertados, com descrição detalhada, modelos de contratos, preços e condições;

d) Possuir histórico de, no mínimo, 12 meses de operação na CCEE e uma comercialização anual de pelo menos 10 MW médios, sem descumprimento de obrigações nesse período; salvo para candidatos que não apresentem o prazo mínimo de atuação, com controle societário direto e indireto de agentes que cumpram tais exigências.

Na resolução, também se especifica que só poderão ser feitos contratos com energia convencional especial e incentivada especial, sendo permitida a aquisição parcial de energia elétrica junto à distribuidora local (ANEEL, 2013).

Por fim, o apresentado nesta seção permite verificar o vasto conjunto normativo-legal existente para a GD e sua aplicação no modelo mercantil do SEB, embora ainda sejam necessários aperfeiçoamentos para lograr um ambiente de negócios com características de um mercado cada vez mais competitivo.(GODOI, 2017)

Todas as negociações do mercado varejista de energia tem a supervisão do CCEE para sua execução legal, o mesmo tem projetos de ampliar os comerciantes que possam comprar e vender energia nesse sistema, atualmente o mínimo de consumo necessário para fazer essa migração são 500kW, porém já se estuda os projetos na câmara que permitirão demandas menores de fazer essa solicitação, podendo em 2028 não haver mais valor mínimo para fazer a mudança.

2.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Nesse capítulo foi apresentado os conceitos básicos de Blockchain, seu método de funcionamento e protocolos da mesma forma como o procedimento do mercado varejista de energia e os requisitos necessários para fazer parte desse grupo.

Sendo essa tecnologia e aplicação relativamente recente, grande parte da fundamentação teórica foi retirada de artigos científicos relacionados ao tema.

O mercado varejista de energia apesar de ser relativamente recente, tem sido amplamente divulgado por conta disso houve maior abundância de informações sobre o tema tanto em artigos científicos como nos órgãos reguladores como por exemplo a ANEEL e a CCEE.

Os conhecimentos adquiridos nesse capítulo serão essenciais para a elaboração dos capítulos seguinte deste trabalho.

3 REVISÃO DA LITERATURA E TECNOLÓGICA

3.1 REVISÃO DA LITERATURA

Este capítulo tem como objetivo a parte da coleta de informações confiáveis e atuais dos temas de relevância para a construção e execução do trabalho de conclusão de curso proposto.

3.1.1 Processo de seleção de portfólio bibliográfico

Está etapa se inicia através da coleta do estado da arte relacionado ao tema em questão que é mercado varejista de energia e Blockchain. Assim, iniciou-se a aquisição de artigos científicos através do Portal de Periódicos da Capes, disponibilizado pelo Ministério da Educação (MEC).

Para uma coleta de artigos adequada, foi considerado a combinação de palavras-chave relacionadas ao tema, mercado varejista de energia e Blockchain.

A combinação de palavras-chave resultou em uma busca, conforme pode-se observar na TABELA 1.

TABELA 1 – Combinação de palavras-chave

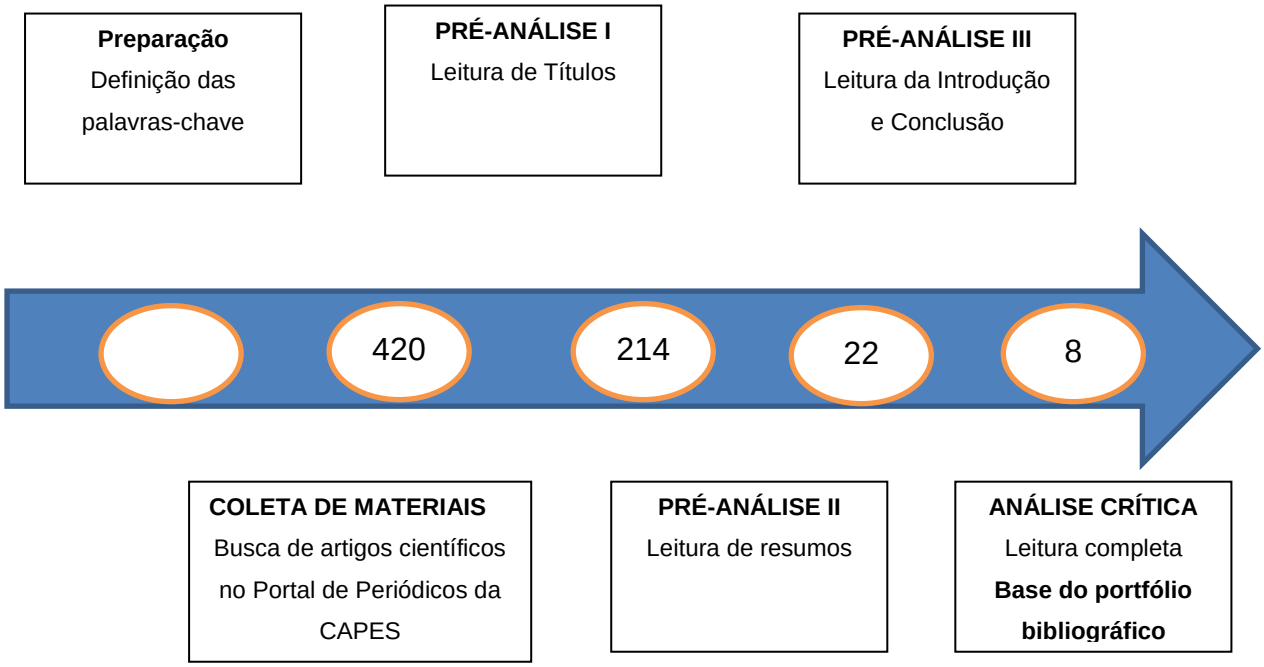
PESQUISA	
I	Mercado Varejista de Energia + Blockchain

FONTE: O autor (2019)

Após a definição da palavra-chave, foi realizada uma busca nas bases cientificas de maior relevância acadêmica, sendo, IEEE, Elsevier, Scopus e Springer, revistas de relevância para pesquisas na área da engenharia elétrica.

Posteriormente a validação da palavra-chave e as bases de dados (Editoras), realizou-se o processo de buscas dos artigos científicos. Ao termino do processo de busca, foram levantados 420 artigos, por conta dessa elevada quantidade fez-se necessário uma seleção do material levantado. Para a otimização desse processo foi utilizado a metodologia de portfolio sugerida por (ENSSLIN; et al., 2011). Desta maneira, foi estruturado um fluxograma para representar o procedimento percorrido conforme apresentado na FIGURA 1.

FIGURA 1 – Estratégia de coleta e análise de artigos científicos



Fonte: O autor (2019)

A primeira filtragem foi realizada através da pré-análise I a partir da leitura dos títulos que resultou em 214 artigos. Na etapa pré-análise II, foi realizado a leitura dos resumos dos artigos selecionados resultando em 22 artigos. Na pré-análise III, foi realizado a leitura da introdução e das conclusões que resultou em 8 artigos considerados relevantes para a atual pesquisa, conforme apresentado na TABELA 2.

TABELA 2 – Portofólio dos artigos selecionados

	TÍTULOS DOS ARTIGOS BASE PARA PESQUISA	PERIÓDICO
1	A Distributed Electricity Trading System in Active Distribution Networks Based on Multi-Agent Coalition and Blockchain	IEEE Transactions on Sustainable Energy
2	Blockchain: a secure, decentralized, trusted cyber infrastructure solution for future energy systems	Journal of Modern Power Systems and Clean Energy
3	Decentralized P2P energy trading under network constraints in a low-voltage network	IEEE Transactions on Sustainable Energy
4	Designing Decentralized Markets for Distribution System Flexibility	IEEE Transactions on Sustainable Energy
5	Designing microgrid energy markets: A case study: The Brooklyn Microgrid	Applied Energy
6	Energy trading for fun and profit buy your neighbor's rooftop solar power or sell your own-it'll all be on a blockchain	IEEE Spectrum
7	How the Brooklyn Microgrid and TransActive Grid are paving the way to next-gen energy markets	The Energy Internet
8	Prosumer integration in wholesale electricity markets: Synergies of peer-to-peer trade and residential storage	Energy and Buildings

FONTE: O autor (2019)

Posteriormente a conclusão da seleção do portfólio bibliográfico, foi constatada a relevância em avaliar a qualidade da produção cientifica relacionada deste processo de seleção de portfólio bibliográfico. Para tal, as métricas selecionadas para ilustrar os indicadores bibliométricos do portfólio selecionado estão na tabela 3.

Este trabalho de indicadores bibliométricos foi realizado com o suporte da ferramenta computacional conhecida por *Publish and Perish,* a qual realiza buscas de publicações utilizando a base de dados do Google Scholar e da *Microsoft Academic Search.*

TABELA 3 – Indicadores Bibliométricos do Portfolio

Índices bibliométricos	
Ano de Publicações	2017-2019
Total de Artigos	8
Total de Citações	156
Citações por ano	78
Citações por artigo	19.5
Citações por autores	30.37
Artigos por autores	2.37
Autores por artigos	3.75
Índice H	3

FONTE: O AUTOR(2019)

Foram analisados os indicadores bibliométricos para os 8 artigos científicos que formam a base para esta pesquisa e os índices selecionados foram: ano de publicação, total de citações, citações por ano, citações por artigos, por autores, artigos por autores e autores por artigos.

3.2 Análise da literatura

No trabalho de (DONG; LUO; LIANG, 2018), é mostrado uma introdução aos conceitos e comportamentos do blockchain, uma proposta de infraestrutura *cyber-physical*, discutindo, assim, diversas aplicações do blockchain em futuros sistemas energéticos e, ainda, discute possíveis desafios na implementação prática desses sistemas e suas possíveis soluções.

O artigo de (GUERRERO; CHAPMAN; VERBIC, 2018) ,apresenta uma proposta de metodologia para avaliar o impacto das transações ponto-a-ponto e para assegurar que essas transações não violem as restrições da rede. Os autores testaram essa metodologia e obtiveram resultados comprovando que a mesma garante a operação sem violar as limitações impostas pela rede de energia.

Já na pesquisa feita por (MENGELKAMP et al., 2018), traz o conceito de micro redes de energia baseadas em blockchain sem a necessidade de intermediários centrais sendo essa uma das grandes vantagens do uso da mesma. Os autores realizaram o projeto “Brooklyn Microgrid”, através do qual foi verificado que blockchain são elegíveis para a comercialização de energia em micro redes descentralizadas.

O artigo de (MORSTYN; TEYTELBOYM; MCCULLOCH, 2019), traz um design de mercado de energia descentralizado, o qual apresenta flexibilidade, pois

permite gerenciar restrições locais de demanda e uma melhor compreensão sobre as situações enfrentadas pela região e um barateamento nos custos de transmissão.

Na publicação do (NORDRUM, 2017), é apresentado uma discussão sobre o mercado de fontes adicionais de energia. Os autores apresentam dois projetos, o TransActive Grid da empresa LO3 *Energy* e um na Alemanha com a parceria entre o fornecedor de baterias Sonnen e a operadora de rede Tenne T. Holding. Esses projetos estão estudando a implantação de mercados de energia onde os fornecedores e clientes são pré-aprovados. Os autores relatam que existem outros projetos que estão trabalhando com o sistema aberto, ou seja, sem a pré aprovação de clientes e fornecedores.

O trabalho dos (LUO et al., 2018), traz uma proposta de sistema de distribuição de energia, divido em duas camadas. Os resultados das simulações realizadas mostram que o mecanismo proposto aumenta a eficiência na rede de distribuição de energia.

A pesquisa dos (ORSINI et al., 2018), os autores apresentam um panorama histórico até o surgimento dos projetos de negociação de energia e apresentam os avanços com os projetos e seus benefícios para a região de efeito do mesmo. O próximo passo é a transação de energia utilizando infraestrutura pública.

O artigo dos (ZEPTER et al., 2019), é apresentado um projeto de estrutura para integrar a comunidade de produtores de energia nos mercados existentes. Os autores apresentam o Smart Eletricity Exchange Plataform(STEP), uma interface, que coordena a oferta e demanda, entre as comunidades consumidoras que produzem enrgia(*prosumers)* e mercados varejistas de eletricidade.

Para uma melhor visualização dos aspectos chaves de cada artigo foi realizado um resumo na TABELA 4.

TABELA 4 – Pontos-chaves dos artigos

Título do artigo	Blockchain		Mercado Varejista de Energia	
	Descentralização	Ponto-a-Ponto	Comercialização	Intermediário
Blockchain: a secure, decentralized, trusted cyber infrastructure solution for future energy systems	X		X	
Decentralized P2P Energy Trading under Network Constraints in a Low-Voltage Network		X	X	
Designing microgrid energy markets. A case study: The Brooklyn Microgrid	X	X	X	
Designing Decentralized Markets for Distribution System Flexibility	X	X		X
Energy Trading for Fun and Profit Buy your neighbor's rooftop solar power or sell your own— it'll all be on a blockchain	X		X	
Prosumer integration in wholesale electricity markets: Synergies of peer-to-peer trade and residential storage	X	X		X
A Distributed Electricity Trading System in Active Distribution Networks Based on MultiAgent Coalition and Blockchain	X	X	X	
How the Brooklyn Microgrid and TransActive Grid are paving the way to next-gen energy markets	X		X	X

FONTE: O AUTOR(2019)

3.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Todos os artigos foram de grande relevância para a fundamentação desse trabalho da mesma forma que foi possível ampliar as possibilidades de métodos e procedimentos a serem para uma otimização na coleta de dados mais precisos e corretos.

4 MATERIAL E MÉTODOS

Todos os materiais e métodos utilizados para a confecção desse trabalho para a obtenção dos resultados estão apresentados na sequência.

4.1 MATERIAL

Para a execução desse trabalho, foram utilizados diversos recursos que serão apresentados em tópicos para melhor visualização a seguir.

- Foi utilizado a ferramenta computacional GridLAB-D;
- Sistema de teste de 13 barras do IEEE;
- Curvas de cargas reais;
- Ferramenta de planilhas gráficas Microsoft Office Excel;
- Ferramenta de edição de código-fonte Visual Studio Code;
- Ferramenta de edição de texto Notepad++;

Todas as análises, simulações e coleta de dados foram realizadas no mesmo computador com processador Intel® Core™ i7-5500 CPU @ 2.40 GHz, com 8GB de memória RAM e sistema operacional Windows 10 de 64 bits.

4.1.1 GridLAB-D

A ferramenta de análise e simulação de sistemas elétricos, GridLAB-D, foi desenvolvida inicialmente para o uso de modelagens com algoritmos de alto desempenho, proporcionando aos usuários que projetam ou estudam esses sistemas informações de relevância.

O software em questão foi originalmente construído pelo *Pacific Northwest National Laboratory* (PNNL) a partir de um financiamento por parte do U.S *Department of Energy Office and Eletricity Delivery and Energy Reliability* (DOE/OE). Além do mais, possui tanto colaboração do meio acadêmico quanto da indústria, resultando em um aumento na utilização e disponibilidade de recursos (GRIDLAB-D,2019).

O GridLAB-D permite o monitoramento dos estados de diversas variáveis de modo simultâneo, graças ao seu caráter de analise em regime permanente, ao qual

possibilita a liberdade para optar entre as possibilidades e/ou conjunto de informações dos quais se deseja obter a partir de simulações.

Como o software GridLAB-D não apresenta uma interface gráfica, foi utilizado o *prompt* de comando para a execução e realização das atividades desejadas. Como a extensão do programa é no formato *GridLAB-D Modeling*(GLM, com a extensão .glm), tendo a possibilidade de ser editado em determinados programas que consigam suportar esse formato, no caso em questão foi utilizado o Notepad++ que apresenta maior facilidade de manuseio e é capaz de ler e salvar no mesmo formato após as devidas alterações.

A ferramenta computacional GridLAB-D tem uma grande quantidade de recursos no sistema de distribuição, divididos em módulos. Estes módulos são separados de acordo com a relação de abordagem, onde podem ser citados os mais relevantes como os relacionados a Clima (*Climate*), Geradores (*Generator),* Cargas residenciais (*Residential)*, Mercado Energético *(Market)*, Otimização de fluxo de potência (*MatPower)* e o de fluxo de potência (*PowerFlow)*.

No módulo de gerados, o arquivo apresenta uma variedade de sistemas entre eles alguns modelos de geradores solares e eólicos que apresentam uma variedade de tipos e modelos disponíveis no programa.

O módulo de maior relevância para esse projeto é o *PowerFlow*, pois se refere ao sistema capaz de modelar e simular o sistema que é o grande objetivo do atual trabalho. O sistema utilizado não apresenta balanceamento entre suas fases, impossibilitando o uso de certos softwares, porém o GridLAB-D permite a modelagem mesmo nessas condições e coletar os fluxos de potência entre os pontos do sistema.

Mesmo o GridLAB-D tendo suas simulações em regime permanente, ele é capaz de parametrizar as cargas de forma a variar no tempo sendo assim capaz de realizar diferentes amostras em tempos diferentes de forma dinâmica.

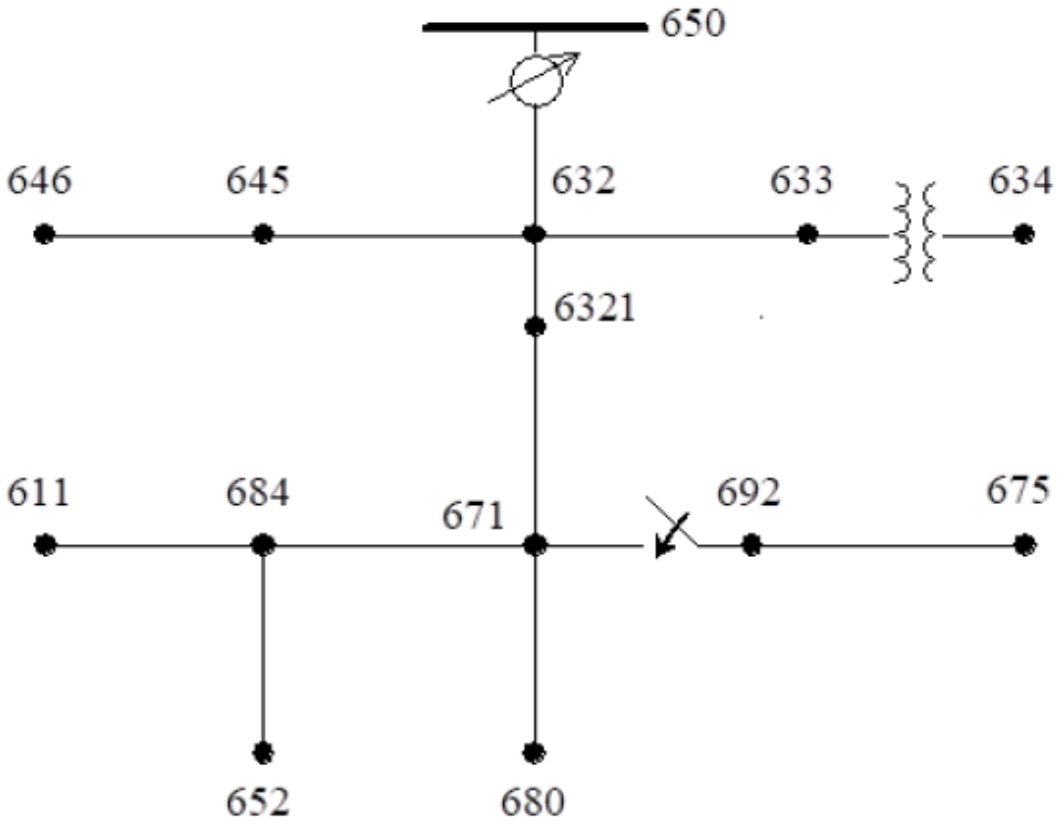
Para uma melhor visualização dos resultados produzidos pela ferramenta computacional, sua saída pode ser feita em formato (CSV, da extensão .csv) podendo assim ser exportada para um software capaz de analisar os dados e produzir os resultados em forma de tabela ou mesmo gráfica.

4.1.2 ALIMENTADORES DE TESTE

O alimentador escolhido foi o de 13 barras disponível na plataforma do IEEE ao qual será modelado e simulado no software GridLAB-D. O sistema de 13 barras apresenta informações equivalente a um alimentador real e com resultados já consolidados, sendo divulgado pelo IEEE para o uso aplicado de simulações e modelagens.

O sistema de 13 barras é composto por cargas desbalanceadas, transformador de distribuição, regulador de tensão, banco de capacitores, linhas trifásicas e ramais de ligação monofásicos, bifásicos e trifásicos. O diagrama unifiliar do alimentador teste está ilustrado na FIGURA 2.

FIGURA 2 – Diagrama unifilar do caso teste de 13 barras



FONTE: Adaptado do IEEE (2019)

A grande vantagem desse sistema é como descrito anteriormente o seu grande número de componentes elétricos colocados em um sistema de pequeno porte, apresentando média tensão de 4.160V e baixa tensão de 480V, contendo tanto

linhas aéreas quanto subterrâneas e apresenta as cargas desbalanceadas como citado anteriormente. O mesmo apresenta 3 modelos de carga, Z, PQ e I, sendo respectivamente o modo de impedâncias constantes, potências ativas e reativa constantes e corrente constante. A distribuição de cargas é apresentada na TABELA 5, totalizando uma carga máxima no sistema de 4.053,6 kVA.

TABELA 5 – Distribuição das cargas instaladas entre as barras

Barras	Modelo de carga	Fase A	Fase A	Fase B	Fase B	Fase C	Fase C
		kW	kvar	kW	kvar	kW	kvar
634	Y-PQ	160	110	120	90	120	90
645	Y-PQ	0	0	170	125	0	0
646	D-Z	0	0	230	132	0	0
652	Y-Z	128	86	0	0	0	0
671	D-PQ	390,67	223,33	407	232,67	424	242,67
675	Y-PQ	485	190	68	60	290	212
692	D-I	0	0	0	0	170	151
611	Y-I	0	0	0	0	170	80
6321	Y-PQ	11,33	6,67	44	25,33	78	45,33
TOTAL		1.175	616	1.039	665	1.252	821

FONTE: Adaptado de IEEE (2019)

Como o sistema de teste de 13 barras está disponível e liberado para acesso ao público, as tabelas mostradas aqui para frente foram retiradas do próprio site da IEEE.

Como foi citado, a grande vantagem desse sistema é sua capacidade de colocar em um modelo de pequeno porte um grande número de variáveis e cenários diferentes acaba se tornando necessário a apresentação na tabela 6.Onde se pode visualizar componentes específicos de cada situação.

TABELA 6 – Dados das linhas de energia

Node A	Node B	Length(ft.)	Config.
632	645	500	603
632	633	500	602
633	634	0	XFM-1
645	646	300	603
650	632	2000	601
684	652	800	607
632	671	2000	601
671	684	300	604
671	680	1000	601
671	692	0	Switch
684	611	300	605
692	675	500	606

FONTE: IEEE (2019)

As tabelas 7, 8 e 9 se faz de relevância serem apresentadas pois, apesar de serem componentes já presentes no sistema de 13 barras eles são fixos no sistema, não podendo ver sua variação no tempo devendo assim ser considerados, respectivamente temos a tabela do regulador de tensão, transformador e capacitor.

TABELA 7 – Dados do Regulador de Tensão

Regulator ID:	1		
Line Segment:	650 - 632		
Location:	50		
Phases:	A - B -C		
Connection:	3-Ph,LG		
Monitoring Phase:	A-B-C		
Bandwidth:	2.0 volts		
PT Ratio:	20		
Primary CT Rating:	700		
Compensator Settings:	Ph-A	Ph-B	Ph-C
R - Setting:	3	3	3
X - Setting:	9	9	9
Volltage Level:	122	122	122

FONTE: IEEE (2019)

TABELA 8 – Dados do Transformador

	kVA	kV-high	kV-low	R - %	X - %
Substation:	5,000	115 - D	4.16 Gr. Y	1	8
XFM -1	500	4.16 – Gr.W	0.48 – Gr.W	1.1	2

FONTE: IEEE (2019)

TABELA 9 – Dados dos Cpacitores

Node	Ph-A	Ph-B	Ph-C
	kVAr	kVAr	kVAr
675	200	200	200
611			100
Total	200	200	300

FONTE: IEEE (2019)

4.1.3 Curvas de Carga

Originalmente o alimentador de teste apresenta uma natureza estática, sendo assim, de maneira inicial o sistema somente simularia um único momento no tempo.

Por conta disso, os sistemas que usam GD e sistemas que armazenam energia ficam comprometidos, já que é impossibilitado uma análise durante o período de execução.

Em decorrência dessa situação se fez necessário que as barras 634, 645, 671 e 675 terão uma carga variante, tendo alteração nos seus valores em períodos de 30 minutos, pelas 24 horas que o sistema do GridLAB-D irá estar simulando.

Os dados das cargas foram coletados de um estudo anterior sobre o mesmo sistema de 13 barras ao qual tinha enfoque características de residências de média renda.(YAMAKAWA, 2007).

4.2 MÉTODOS

O método utilizado para a compreensão e resolução dos problemas serão explicados de maneira distribuída de acordo com cada caso que for se apresentando.

4.2.1 Primeiro Caso – Curvas de Carga

Nessa etapa se faz necessário a simulação utilizando o caso base do sistema de 13-barras disponível pelo IEEE, usando o software GridLAB-D. Essa primeira simulação irá acompanhar todo o projeto pois esse será considerado o caso de referência para todas as demais operações que serão realizadas e porque representa um sistema de 13-barras convencional. Na situação atual será substituído as cargas constantes por cargas que possam variar com o tempo. Por motivos de limitações do sistema de 13-barras só serão alteradas as cargas das barras de número 634, 645, 671 e 675.

4.2.2 Segundo Caso – Placares Solares e Energia Eólica

Na terceira situação será adicionado ao sistema de 13-barras os painéis fotovoltaicos na barra de 675 e 645 e o sistema de geração de energia eólica de médio porte será acrescido na barra de 634. Para o presente caso foi selecionado o 22 de julho de 2001 que após alguns testes se mostrou um dia de maior incidência solar, sendo interessante para uma melhor visualização do comportamento dos painéis fotovoltaicos e também apresenta uma boa incidência de ventos o que melhora a coleta de resultados para a unidade eólica.

4.2.3 Terceiro Caso – Aplicação do Blockchain

Essa etapa se fará o uso das tabelas exportadas pela ferramenta computacional no formato CSV para serem importados no sistema que irá simular o blockchain. O programa que fará esse procedimento foi confeccionado utilizando a linguagem Python no sistema de edição de linguagem de programação Visual Studio Code.

A função primordial do blockchain no programa é a sua capacidade de gerenciar um sistema de 13-barras, permitindo ou recusando transações que podem trazer problemas ou operações que ocasionariam danos ao mesmo. Sendo assim, caso o fator de potência chegue a valores abaixo de 0,92 por conta de um excedente de energia solar ou eólica querendo entrar na rede essa transação será impedida via blockchain para aquele momento, podendo ser realizado em outro que não resulte nessa situação.

Além dessa regra colocada para o bom funcionamento da rede elétrica também foi estipulado que o sistema não pode sofrer mais de 5% de variação de tensão em relação ao seu valor original ao ocorrer a entrada de energia de fontes renováveis no sistema de 13-barras. Sendo a operação recusada caso ultrapasse os limites estipulados.

Após todas essas estipulações, o GridLAB-D irá simular o caso com fontes renováveis utilizando a criação dos blockchains de forma bem similar com o

procedimento real que use blockchain principalmente na questão de criptografia e geração das funções hash que aumenta os níveis de segurança.

Sendo cada bloco gerado no intervalo de 30 minutos, isso se deve ao fato de como o GridLAB-D está produzindo os seus resultados. Esses blocos serão gerados por um período de 24 horas.

Nessa etapa, o objetivo era utilizar o blockchain como um sistema de gerenciamento de transações que serão permitidas ou recusadas pelo sistema.

5 ANÁLISE DOS RESULTADOS E DISCUSSÃO

No capítulo serão apresentados os resultados das modelagens e simulações coletados nas etapas anteriores, também contendo a análise das situações.

5.1 Resultados – Curvas de Carga

Na situação em estudo, já havia sido considerado as barras com cargas que variavam no tempo, consecutivamente isso mudava os valores das potências por fase e o fator de potência em cada uma das barras.

Após as devidas configurações no sistema, foi realizado a simulação e coletado os dados das barras no formato CSV como informado anteriormente junto com as suas potências aparentes e fatores de potência e ilustrado na tabela 10 e nas figuras 3, 4 e 5 que representam respectivamente as barras 675, 645 e 634 depois de algumas adaptações no formato exportado.

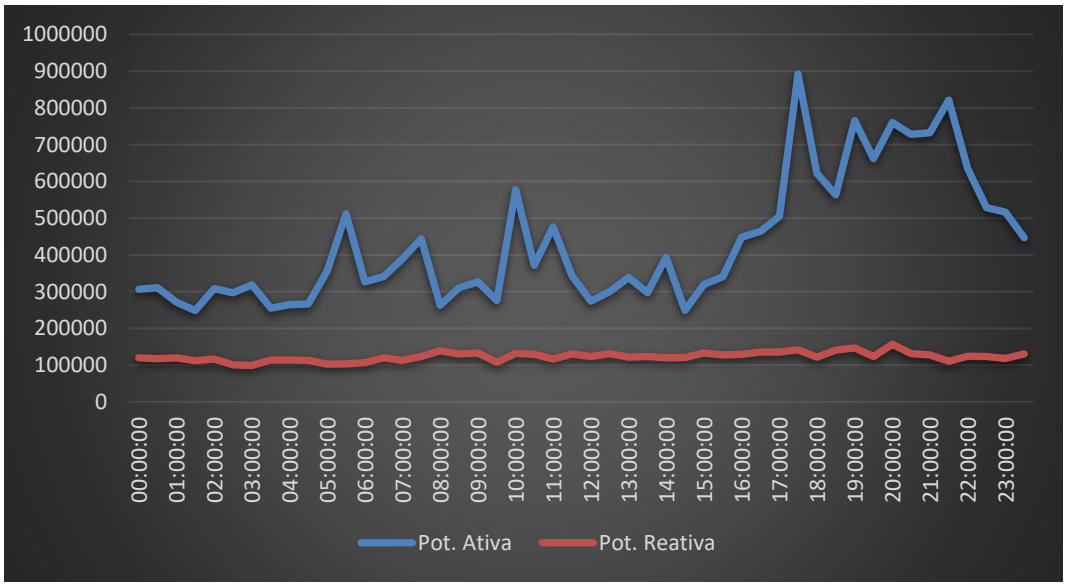
TABELA 10 – Curva de Carga e FP 634, 645 e 675

Horário	Pot. Ap. 634	FP da 634	Pot. Ap. 645	FP da 645	Pot. Ap. 675	FP da 675
00:00	173664.2799	0.921240684	364166.0809	0.897904877	329081.7608	0.930834025
00:30	167687.6027	0.912824189	353059.279	0.886587094	331753.1111	0.935272917
01:00	142461.3546	0.87232078	331305.9196	0.87167051	297011.0318	0.914817198
01:30	130603.1016	0.87211252	326436.6678	0.872171322	272688.7625	0.911320649
02:00	153402.0081	0.894930918	331206.8819	0.872003922	329748.3347	0.935162873
02:30	144157.7208	0.915026259	330651.8789	0.870453847	313615.1283	0.946792655
03:00	156749.0778	0.92479332	338321.2417	0.87786566	333656.5466	0.954832157
03:30	133880.5659	0.876550672	328468.6813	0.874069634	278869.523	0.913422511
04:00	141125.3978	0.886146661	333826.2304	0.874897097	288153.2366	0.918506775
04:30	142068.9435	0.894046207	335605.0495	0.88175193	289482.8201	0.921010787
05:00	181456.2554	0.942624985	354655.0404	0.89472745	370533.2299	0.960878192
05:30	253080.0777	0.973384797	383553.6668	0.911336093	522338.2201	0.980373598
06:00	160834.0789	0.932072985	333560.1779	0.887650624	343662.8411	0.950044814
06:30	165428.5522	0.895074025	339868.8744	0.861227732	361511.3275	0.943080546
07:00	176187.6763	0.929831776	329500.9932	0.869483267	405145.1231	0.960654289
07:30	199967.9511	0.937645253	333016.5622	0.879697989	460721.3641	0.963225356
08:00	157596.8035	0.843317866	355127.2857	0.866063838	297538.3148	0.88405858
08:30	163713.8676	0.872112437	345122.2594	0.866153057	337143.3536	0.922398133
09:00	177092.9207	0.900465696	360269.0463	0.885205108	352709.3871	0.926472932
09:30	157672.8856	0.908325483	362329.8062	0.88339296	296519.0217	0.931238739
10:00	248558.2361	0.94821521	351575.207	0.872883224	592353.6644	0.974986287
10:30	185446.0882	0.907015088	353711.4695	0.873077428	393509.3754	0.944085257
11:00	216647.2524	0.93876104	349645.1261	0.862805678	490592.8995	0.971565223
11:30	173243.5032	0.90203498	338115.3036	0.870685819	366580.3951	0.934654729
12:00	150907.2974	0.864415454	343632.621	0.861500282	300862.6407	0.912054416
12:30	162095.7193	0.864466382	346339.9397	0.860871548	327474.6015	0.915903397
13:00	169282.8619	0.910754924	337419.1006	0.875099541	359804.8539	0.941416705
13:30	159246.0728	0.879004409	344233.3712	0.865833254	321252.894	0.923036976
14:00	179728.1353	0.917056752	335132.7166	0.867485583	411744.6562	0.956483573
14:30	138436.7484	0.871806087	336348.3685	0.875777996	277049.8389	0.89968614
15:00	165499.5779	0.901854264	335348.6678	0.883824892	345989.6787	0.923633333
15:30	172888.1848	0.904167628	339435.4202	0.872272257	363247.4382	0.936253265
16:00	213523.3384	0.936658266	340513.6305	0.875496524	467160.6002	0.960580793
16:30	236680.625	0.945180451	381933.9489	0.900110349	483147.6845	0.9596871
17:00	260007.3447	0.958221008	384201.2842	0.908990455	523292.9177	0.965725663
17:30	402461.4288	0.977949368	415257.5896	0.9087805	903338.8364	0.987699038
18:00	281249.0971	0.968667643	360238.3662	0.893409837	633057.4627	0.981467302
18:30	304407.0563	0.966313671	426590.1023	0.924765713	580517.7214	0.970260303
19:00	353874.5544	0.974474699	393184.64	0.911972299	779233.056	0.982103998
19:30	311956.2258	0.974327405	389413.6023	0.908921768	673140.4521	0.982944938

20:00	377339.2626	0.973572158	424639.6619	0.921717247	776201.2328	0.979387262
20:30	350662.2287	0.975950849	407018.7284	0.910031589	739748.0609	0.98409599
21:00	346034.5682	0.977297447	405637.6443	0.912519351	743275.5985	0.985154634
21:30	389868.1221	0.984466742	442295.6539	0.919423911	828877.8175	0.991094565
22:00	309392.5357	0.971356337	411551.7981	0.914039258	647223.8919	0.981355151
22:30	248889.6706	0.955855658	364586.0086	0.890610151	543185.632	0.973683339
23:00	250372.5036	0.960813574	380908.646	0.900781864	530134.6558	0.974752347
23:30	218943.6805	0.9445324	358760.4094	0.897078082	465431.2354	0.960189317

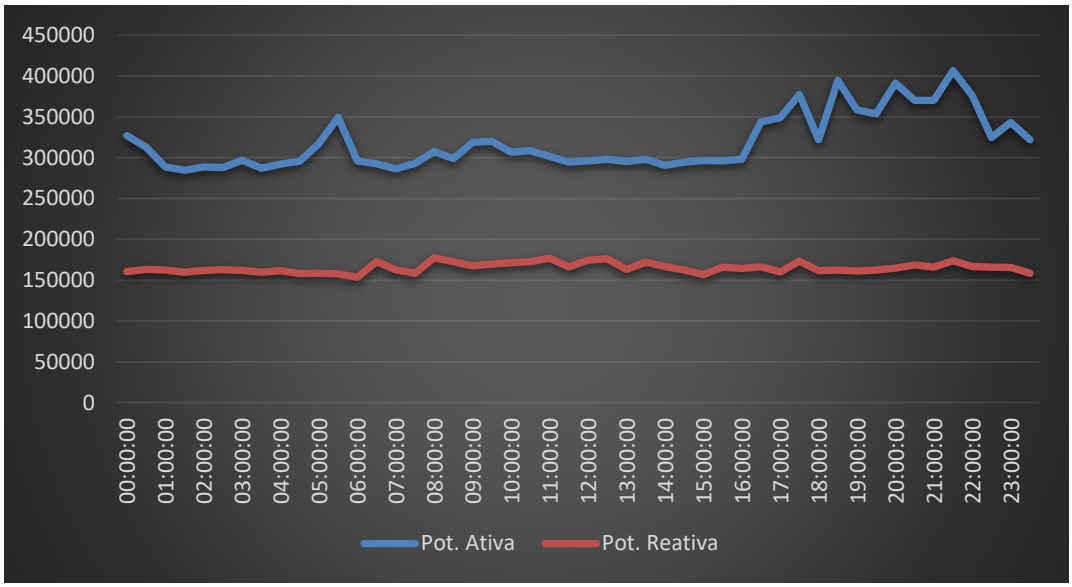
FONTE: O AUTOR(2019)

FIGURA 3 – Curva de Carga da Barra 675



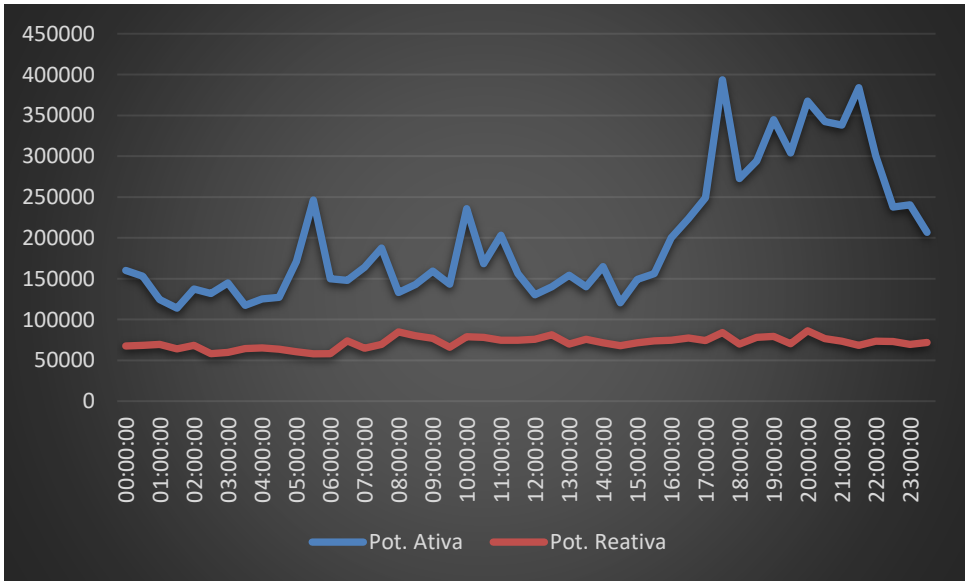
FONTE: O AUTOR (2019)

FIGURA 4 – Curva de Carga da Barra 645



FONTE: O AUTOR (2019)

FIGURA 5 – Curva de Carga da Barra 634



FONTE: O AUTOR (2019)

Como é possível observar, todas as curvas apresentam um comportamento semelhante em decorrência de todas estarem alinhadas com a curva de carga, o único caso que se mostra mais discrepante é o da barra 645, isso se deve ao elevado valor da parte reativa em relação a parte ativa que acaba distorcendo o formato da curva, porém mantém uma proporção nos pontos de pico com relação as outras curvas.

5.2 Resultados – Placas Solares e Energia Eólica

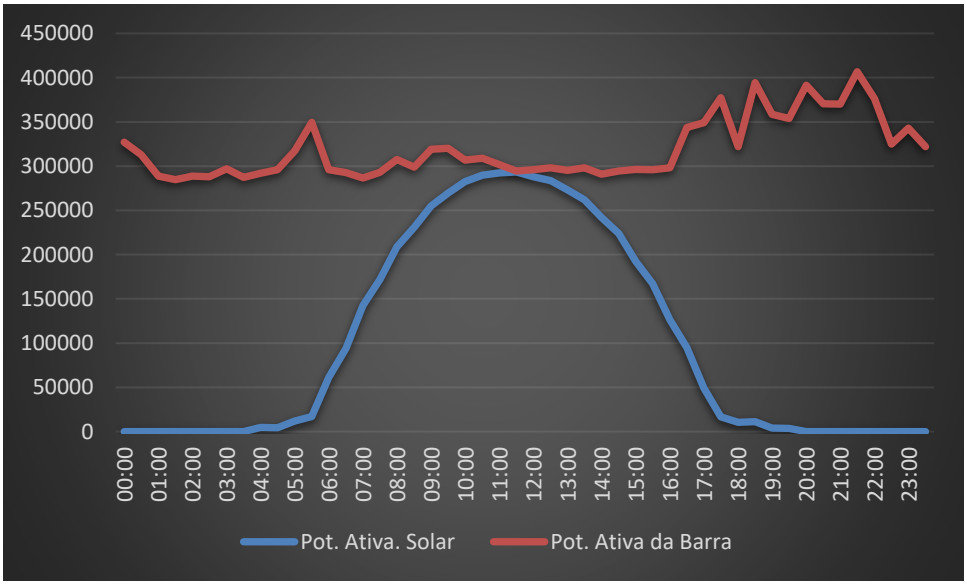
Como uma etapa posterior a outra, nessa situação se fez necessário a instalação de 2 painéis fotovoltaicos e uma unidade eólica, para isso se fez necessário uma pesquisa sobre as necessidades de alteração de código e o que deveria ser adicionado, o mecanismo que se mostrou mais relevante nessa etapa foi o comando *climate* que tinha na base de dados as situações climáticas que ocorriam no mundo e para a melhor realização dessa etapa, foi necessário encontrar um dia que apresenta-se alta incidência solar como fortes rajadas de vento, para isso foram testados vários dias diferentes até ser encontrado um que atendeu as expectativas.

Sendo assim, foi instalado os painéis solares nas barras 645 e 675 enquanto que a unidade eólica foi instalada na barra 634. Sendo que na barra 645 terá um potencial instalado de 280 kW enquanto que na barra 675 terá um potencial instalado de 90 kW, para a unidade eólica foi instalado com um potencial de 10 kW.

Na figura 6 podemos visualizar o comportamento do painel solar em um dia ensolarado com relação a potência ativa do barramento 645, resultando que somente no pico ele conseguia suprir a demanda exigida na barra, porém com o crescimento rápido e barateamento dos mesmos ,situações em que uma maior quantidade de painéis solares forem utilizados poderá sim suprir e auxiliar na redução dos custos da regiões de tarifa mais

cara da mesma forma que a negociação de energia poderá ser feito nesses momentos.

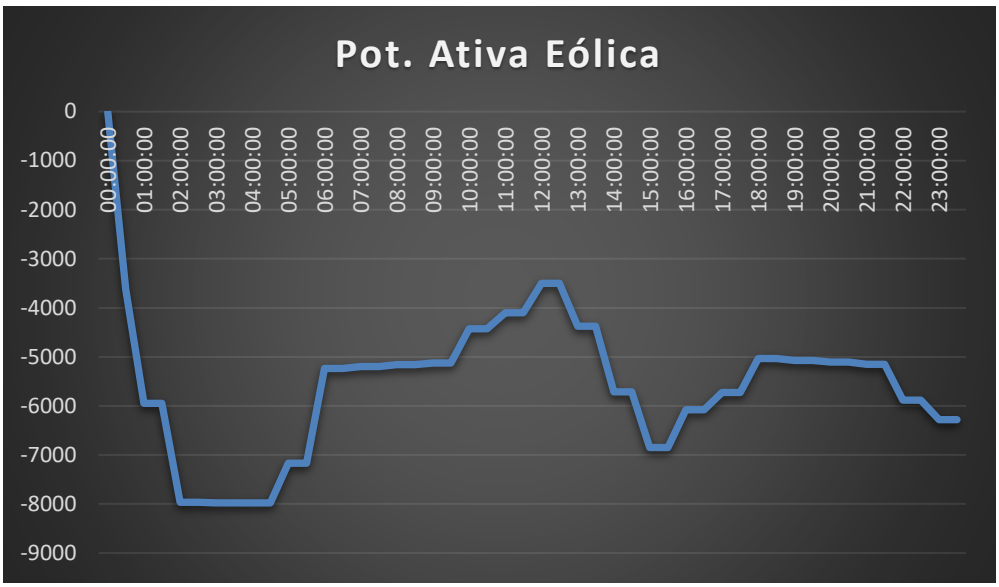
FIGURA 6- Painel Solar no barramento 645



FONTE: O AUTOR (2019)

Já para o uso da unidade eólica temos o resultado apresentado na figura 7, sendo apresentado com um valor de potência negativo em decorrência do comportamento que a energia é obitdo no sistema eólico e apresenta um formato retangular de crescimento e decrescimento.

Figura 7 – Unidade Eólica no barramento 634



FONTE: O AUTOR(2019)

5.3 Resultados – Aplicação do Blockchain

Como foi discutido previamente os sistemas abordados nesse estudo no 13-barras não foi capaz de gerar perturbações muito significativas para, por exemplo, gerar um fluxo reverso ou uma forte variação na tensão, porém com a injeção de uma grande quantidade de potência ativa acabará resultando em um aumento no fator de potência melhorando o sistema desde que nas devidas proporções, resultado que as negociações ocorrerão via blockchain sem nenhum impedimento por parte do blockchain já que as restrições do 5% de tensão e o FP menor que 0,92 não irão afetar na situação apresentada.

6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

O projeto tinha como objetivo a realização de uma simulação utilizando a ferramenta computacional GridLAB-D para realizar operações com fontes de energias renováveis acopladas ao sistema de 13-barras disponibilizados pelo IEEE, sendo utilizado cargas variáveis para conseguir fazer analise no domínio do tempo em mais de um ponto.

Foi possível rodar de maneira satisfatório as fontes renováveis no programa, porém pelo GridLAB-D ser um sistema sem interface e de diferentes tipos de comando e bibliotecas, a tarefa se tornou mais exaustiva, demandando mais tempo e recursos para a compreensão, implementação e aplicação desse sistema, posteriormente foi necessário a confecção e criação de um programa utilizando linguagem Python capaz de criar blockchain para que assim fosse possível e viável as transações de forma segura e fácil, também se tornando um ótimo meio de gerenciar o que entra e sai da rede de energia.

O uso de software livres permite a analise e reprodução de maneira mais fácil e viável para as demais pessoas que tenham interesse nesse tipo de projeto e realização, porém a ausência de interface dificulta uma adaptação agradável para com o mesmo, entretanto muitos locais na internet se mostram verdadeiras aulas de conhecimento para todos aqueles que querem adentrar o uso do software GridLAB-D.

Para projetos futuros recomenda-se um melhor gerenciamento de tempo para o estudo e aplicação do GridLAB-D e a possível criação de uma criptomoeda própria para o sistema de energia, pois o Etherium acabou se apresentando uma moeda de difícil compatibilidade para negociações dinâmicas realizadas no mercado varejista de energia.

7 REFERÊNCIAS

CCEE (2019). Câmara de comercialização de energia elétrica: Fontes. Disponível em: encurtador.com.br/dwyP8. Acesso em: 12/03/2019.

Gellings, C. W. (2009). Chapter 1 - What is the Smart Grid. In The Smart Grid: Enabling Energy Efficiency and Demand Response. The Fairmont Press. ISBN ISBN 0-88173-624-4.

Jiayi, H., Chuanwen, J., e Rong, X. (2008). A review on distributed energy resources and microgrid. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 12(9):2472 – 2483. ISSN 1364-0321.

DONG, Z.; LUO, F.; LIANG, G. Blockchain: a secure, decentralized, trusted cyber infrastructure solution for future energy systems. **Journal of Modern Power Systems and Clean Energy**, v. 6, n. 5, p. 958–967, 2018.

GABRICH, Y. B.; COELHO, I. M.; COELHO, V. N. Tendências para Sistemas Microgrids em Cidades Inteligentes: Uma Visão sobre a Blockchain. **XLIX Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional**, p. 3918--3929, 2017.

GODOI, L. C. D. E. Elementos inibidores e facilitadores na implantação de geração distribuída no brasil. p. 79, 2017.

GUERRERO, J.; CHAPMAN, A. C.; VERBIC, G. Decentralized P2P Energy Trading under Network Constraints in a Low-Voltage Network. **IEEE Transactions on Smart Grid**, v. PP, n. c, p. 1, 2018.

LUO, F. et al. A Distributed Electricity Trading System in Active Distribution Networks Based on Multi-Agent Coalition and Blockchain. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. PP, n. c, p. 1, 2018.

MENGELKAMP, E. et al. Designing microgrid energy markets: A case study: The Brooklyn Microgrid. **Applied Energy**, v. 210, p. 870–880, 2018.

MORSTYN, T.; TEYTELBOYM, A.; MCCULLOCH, M. D. Designing decentralized markets for distribution system flexibility. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 34, n. 3, p. 1–12, 2019.

NORDRUM, A. Energy Trading for Fun and Profit. **IEEE Spectrum**, v. 54, n. 10, p. 54–55, 2017.

ORSINI, L. et al. **How the Brooklyn Microgrid and TransActive Grid are paving the way to next-gen energy markets**. [s.l.] Elsevier Ltd, 2018.

ZEPTER, J. M. et al. Prosumer integration in wholesale electricity markets: Synergies of peer-to-peer trade and residential storage. **Energy and Buildings**, v. 184, p. 163–176, 2019.

Geraldi, D. (2013). Estudo da Microgeração Distribuída no Contexto de Redes Inteligentes. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Campinas. Campinas, São Paulo.

ANEEL. Resolução Normativa no 482 (2012). Agência Nacional de Energia Elétrica. Brasília, Distrito Federal.

ANEEL. Resolução Normativa no 570 (2013). Agência Nacional de Energia Elétrica. Brasília, Distrito Federal.

DONG, Z.; LUO, F.; LIANG, G. Blockchain: a secure, decentralized, trusted cyber infrastructure solution for future energy systems. **Journal of Modern Power Systems and Clean Energy**, v. 6, n. 5, p. 958–967, 2018.

GABRICH, Y. B.; COELHO, I. M.; COELHO, V. N. Tendências para Sistemas Microgrids em Cidades Inteligentes: Uma Visão sobre a Blockchain. **XLIX Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional**, p. 3918--3929, 2017.

GODOI, L. C. D. E. Elementos inibidores e facilitadores na implantação de geração distribuída no brasil. p. 79, 2017.

GUERRERO, J.; CHAPMAN, A. C.; VERBIC, G. Decentralized P2P Energy Trading under Network Constraints in a Low-Voltage Network. **IEEE Transactions on Smart Grid**, v. PP, n. c, p. 1, 2018.

LUO, F. et al. A Distributed Electricity Trading System in Active Distribution Networks Based on Multi-Agent Coalition and Blockchain. **IEEE Transactions on Power**

Systems, v. PP, n. c, p. 1, 2018.
MENGELKAMP, E. et al. Designing microgrid energy markets: A case study: The Brooklyn Microgrid. **Applied Energy**, v. 210, p. 870–880, 2018.

MORSTYN, T.; TEYTELBOYM, A.; MCCULLOCH, M. D. Designing decentralized markets for distribution system flexibility. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 34, n. 3, p. 1–12, 2019.

NORDRUM, A. Energy Trading for Fun and Profit. **IEEE Spectrum**, v. 54, n. 10, p. 54–55, 2017.

ORSINI, L. et al. **How the Brooklyn Microgrid and TransActive Grid are paving the way to next-gen energy markets**. [s.l.] Elsevier Ltd, 2018.

ZEPTER, J. M. et al. Prosumer integration in wholesale electricity markets: Synergies of peer-to-peer trade and residential storage. **Energy and Buildings**, v. 184, p. 163–176, 2019.

GRIDLAB-D. Disponível em: <https://www.gridlabd.org/>. Acesso em: 26/04/2019.

YAMAKAWA, E. K. (2007). Sistema de Controle Nebuloso para Bancos de Capacitores Automáticos Aplicados em Alimentadores de Distribuição de Energia Elétrica. Curitiba.