

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

VICTOR SOARES SISMOTTO

**DESENVOLVIMENTO DE BLOCKCHAIN PARA ARMAZENAMENTO DE  
ENERGIA EM BATERIAS EM REDES ATIVAS DE DISTRIBUIÇÃO**

CURITIBA

2019

VICTOR SOARES SISMOTTO

**DESENVOLVIMENTO DE BLOCKCHAIN PARA ARMAZENAMENTO DE  
ENERGIA EM BATERIAS EM REDES ATIVAS DE DISTRIBUIÇÃO**

Plano do Trabalho de Conclusão apresentada ao Programa de Graduação em 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. Prof. Dr. Alexandre Rasi Aoki.  
Coorientadora: M. Sc. Kristie Kaminski Küster

CURITIBA

2019

## **TERMO DE APROVAÇÃO**

VICTOR SOARES SISMOTTO

### **DESENVOLVIMENTO DE BLOCKCHAIN PARA ARMAZENAMENTO DE ENERGIA EM BATERIAS EM REDES ATIVAS DE DISTRIBUIÇÃO**

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

---

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Rasi Aoki  
Departamento de Engenharia Elétrica, UFPR

---

Prof. Dr. Gustavo Henrique da Costa Oliveira  
Departamento de Engenharia Elétrica, UFPR

---

Prof. Dr. Gideon Villar Leandro  
Departamento de Engenharia Elétrica, UFPR

Curitiba, 25 de Junho de 2019

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço ao orientador Prof. Dr. Alexandre Rasi Aoki pela oportunidade de realização deste trabalho, pelo compromisso e ajuda com a orientação, pelos conselhos, bom humor e pela qualidade de orientação e didática.

Agradeço a coorientadora M. Sc. Kristie Kaminski Küster pela paciência, suporte, dicas e pela excelente educação em me auxiliar durante toda trajetória.

Agradeço especialmente minha mãe, Maria Teresa Pereira Soares, por todo esforço que fez para que eu pudesse ter uma boa educação, alcançar meus objetivos, ser uma pessoa persistente e por me ajudar nos momentos mais difíceis.

Agradeço especialmente meu pai, Reginaldo Sismotto, pelo esforço na minha educação, conselhos e ajuda em situações que não pareciam ter soluções.

Agradeço toda minha família pelos momentos de apoio e incentivo, foram necessários em momentos difíceis durante a execução deste trabalho.

Agradeço a minha namora, Luiza Höera Ganesella, pela paciência, amor, carinho e apoio nos momentos que eu mais necessitava.

Agradeço ao amigo e engenheiro Leonardo Ponte, por ter me ajudado ao longo do trabalho, sendo sempre atencioso, paciente, didático e bem-humorado.

Agradeço a todos meus amigos que estão espalhados pelo Brasil, cada um foi muito importante para me ajudar a ser uma pessoa mais feliz e madura.

Agradeço a empresa FOHAT de Curitiba que me proporcionou um encontro para aprender mais sobre Blockchain e assim melhorar a qualidade do trabalho. Agradeço também ao Francisco Leal, que foi quem me ensinou muito sobre Blockchain, com a paciência, didática e bom humor, melhorou em muito meu conhecimento sobre o assunto.

Agradeço aos meus amigos Paulo Ricardo Dolberth Menezes e Lucas Berbeka Cleto que por termos um tema parecido, nos ajudamos e tentamos resolver diversos problemas juntos.

## RESUMO

Sobre sistemas elétricos de distribuição de energia elétrica, existe um desenvolvimento contínuo de tecnologias novas, aprimoramentos de operação do sistema e novas ferramentas para buscar uma melhor eficiência para prover energia elétrica e sua comercialização através de redes inteligentes. O trabalho proposto possui um modelo de um alimentador em um sistema de 13 barras de energia simulado em um software chamado GridLAB-D. O desenvolvimento do trabalho feito giram em torno do uso de uma rede elétrica inteligente real com aplicação de sistemas de armazenamento de energia para fins comerciais de transação de energia elétrica. A proposta é a avaliação de como um sistema de comercialização de energia feita de forme livre pode ser registrada e contabilizada com o auxílio do Blockchain. O trabalho apresentará através etapas, chamados de casos no presente trabalho, que gradativamente mostram as etapas de desenvolvimento do projeto que são comparadas para mostrar os benefícios da inserção de baterias na rede para comercialização de energia e posteriormente, que o Blockchain cria um cenário de uma energia mais barata que não registrará momentos que a qualidade da energia transmitida pelo sistema e com eficiência de armazenamento dos pagamentos que ocorrerão de forma transparente. Com as análises obtidas nas simulações foi possível verificar que o sistema realizado para a comercialização foi implementado com o uso do Blockchain e adaptado conforme as limitações do softwares. Verificou também que os impactos que as baterias poderiam causar problemas na operação rede, principalmente em momentos de carga e descarga. Foram sugeridas ações para melhorar assim a qualidade de transmissão da energia, tendo em visto do resultado positivo na parte comercial e de armazenamento descentralizado dos dados.

Palavras-chave: GridLAB-D. Bateria. Redes elétricas inteligentes. Comercialização de energia. Blockchain.

## ABSTRACT

About electric power distribution systems, there is a continuous development of new technologies, system operation improvements and new sources to seek for a better efficiency to provide electric energy and its commercialization through smart grids. The proposed work has a model on a feeder in a system of thirteen buses simulated in a software called GridLAB-D. The development this work is related with the use of a real Smart Grid for application of energy storage systems for commercial purposes of electric power transaction. The proposal is the evaluation of how an energy trading system made freely can be registered and counted on the Blockchain. The work will be presented through stages, called cases in the present work, that gradually shows the development stages of the project that are compared to show the benefits that the insertion of batteries in the network for energy commercialization and the creation of a cheaper energy because of Blockchain, who is not going to record moments that the quality of the energy transmitted by the system and with storage efficiency of the payments that will occur in a transparent way. With the analysis obtained in the simulations, it was possible to verify that the system mechanism for the commercialization was implemented with the use of Blockchain and adapted according to the limitations of the software. It also verified that the impacts that the batteries could cause problems in the network operation, especially in times of loading and unloading, and suggested actions were taken to improve the transmission quality of the energy, considering the positive result in the commercial and storage part decentralized data collection.

Key words: GridLAB-D. Electric Battery. Smart Grid. Comercialização de energia. Blockchain.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Estrutura de dados com Hash Pointers.....	15
Figura 2– Merkle tree .....	16
Figura 3 - Características do bloco número 565976 criado.....	19
Figura 4 – Amostra de tempo de criação de cada bloco .....	21
Figura 5 – Recompensa do minerador de um determinado bloco.....	22
Figura 6 - Ethereum state function .....	25
Figura 7 – Exemplo de contrato inteligente .....	26
Figura 8 – Exemplo de métodos descritos em um intervalo de tempo .....	31
Figura 9 – Relação entre BMS e controlador de carga .....	32
Figura 10 – Serviços oferecidos por nível de rede .....	34
Figura 11 – Método de seleção de artigos científicos .....	13
Figura 12 – Alimentador de 13 barras do IEEE .....	20
Figura 13 – Descrição da inserção da bateria no GridLAB-D.....	24
Figura 14 – Inserção das baterias no modelo 13 barras .....	25
Figura 15 – Potências ativas em Watts das três fases da barra SWING .....	12
Figura 16 – Fatores de potências das três fases da barra SWING .....	13
Figura 17 - Potências ativas em Watts das três fases da barra 634 .....	14
Figura 18 – Fatores de potências das três fases da barra 634 .....	14
Figura 19 – Tensões em Volts das três fases da barra 634.....	15
Figura 20 - Potências ativas em Watts das três fases das barras 645/646.....	15
Figura 21 – Fatores de potências das três fases da barra 634 .....	16
Figura 22 – Tensões em Volts das três fases das barras 645/646.....	16
Figura 23 – Potências ativas em Watts das três fases da barra 675.....	17
Figura 24 – Fatores de potências das três fases da barra 675 .....	17
Figura 25 – Tensões em Volts das três fases da barra 675 .....	18
Figura 26 – Preço pago por cada nó e o recebido pela rede de cada nó.....	19
Figura 27 – Potências ativas em Watts que saem da barra SWING .....	20
Figura 28 - Fatores de potências das três fases saem da barra SWING .....	21
Figura 29 - Potências ativas em Watts das três fases até a bateria 675.....	21
Figura 30 – Fatores de potências das três fases até a bateria 634.....	22
Figura 31 –Tensões em Volts das fases até a bateria 634 .....	22
Figura 32 – Potências ativas em Watts das três fases até a bateria 645/646 .....	23

Figura 33 – Fatores de potências das três fases até a bateria 646/646.....	23
Figura 34 - Tensões em Volts das fases até a bateria 645/646. ....	24
Figura 35 – Potências ativas em Watts das três fases até a bateria 675.....	24
Figura 36 – Fatores de potências das três fases até a bateria 675.....	25
Figura 37 – Tensões em Volts das fases até a bateria 675 .....	25
Figura 38 – Agentes do sistema para cada barra para o caso 2.....	28
Figura 39 – <i>Timestamp</i> da cadeia de blocos criada .....	29
Figura 40 – Blocos rejeitados pelo fator de potência.....	30
Figura 41 – Agentes do sistema para cada barra.....	31
Figura 42 – Blocos rejeitados com ajuste do critério 3.....	32
Figura 43 – Agentes do sistema para cada barra com ajuste do critério 3.....	32

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Seleção de portfólio.....	13
Tabela 2 – Índices bibliométricos .....	14
Tabela 3 – Comparativo entre as plataformas.....	18
Tabela 4 – Distribuição de cargas das barras .....	21
Tabela 5 – Comprimento das linhas do sistema.....	21
Tabela 6 – Parâmetros do regulador .....	22
Tabela 7 – Precificação parte 1 .....	27
Tabela 8 – Precificação parte 2.....	28
Tabela 9 – Critérios para criação do bloco .....	30
Tabela 10 – Parâmetros adotados na bateria. ....	31

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>12</b>
1.1 CONTEXTO .....	13
1.2 OBJETIVOS.....	14
1.3 JUSTIFICATIVA.....	14
1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	15
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	<b>12</b>
2.1 BLOCKCHAIN.....	12
2.1.1 História .....	12
2.1.2 Criptografia e criptomoeda .....	13
2.1.3 Descentralização com Blockchain .....	18
2.1.4 Contratos inteligentes .....	23
2.1.5 Aplicações com Blockchain.....	26
2.2 ARMAZENAMENTO DE ENERGIA EM BATERIAS .....	27
2.2.1 Conceitos gerais .....	27
2.2.2 Tecnologias de armazenamento.....	28
2.2.3 Armazenamento em pequeno, médio e grande porte.....	33
2.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO.....	35
<b>3 REVISÃO DA LITERATURA E TECNOLOGIA</b> .....	<b>12</b>
3.1 REVISÃO DA LITERATURA.....	12
3.1.1 Processo de seleção de portfólio bibliográfico .....	12
3.1.2 Análise da literatura.....	14
3.2 REVISÃO DA TECNOLÓGICA .....	17
<b>4 MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	<b>19</b>
4.1 MATERIAL.....	19
4.1.1 GridLAB-D .....	19
4.1.2 Alimentador teste.....	20
4.1.3 Análise elétrica do sistema.....	22
4.2 MÉTODOS.....	23
4.2.1 Definição dos casos .....	23
4.2.2 Definições dos procedimentos e localizações das baterias.....	23
4.2.3 Lógica de mercado .....	26
4.2.4 Definições para criação do bloco.....	29

<b>4.2.5 Dimensões da bateria.....</b>	<b>30</b>
<b>5 ANÁLISE DOS RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>12</b>
5.1 CASO 1 - BASE .....	12
5.2 CENÁRIO BASE COM BATERIAS .....	19
5.3 CENÁRIO COM BLOCKCHAIN .....	28
<b>6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>12</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Consumidores residenciais majoritariamente estiveram sua conta atrelada a concessionárias locais de energia elétrica. No século XXI, começaram a surgir e serem implantadas em maior escala tecnologias de produção de energia limpa a nível residencial. Essa implantação aumentou muito na segunda década desse século com painéis fotovoltaicos e energia eólica e tem previsão de continuar expandindo de acordo com (SOLUTIONS, [s.d.]). Com a evolução de armazenamento das baterias, projetos residenciais começaram a adotar o armazenamento e energia para que cada vez mais se tornassem independente da energia que vem da rede elétrica pública. Apesar dos gastos iniciais que ocorrem, acarreta em um benefício financeiro e de autonomia do proprietário ao longo dos anos seguintes.

O Blockchain é uma tecnologia que surgiu para melhorar a qualidade de transações, sendo no quesito confiança, agilidade e registro de cada uma segundo (NAKAMOTO, 2009). Com essa ferramenta, como é demonstrado em poderia melhorar o custo de transações de energia com armazenamento de energia para que os consumidores residenciais que produzem sua própria energia possam vender o excesso de energia elétrica para outras residências, barateando o preço de energia para outros consumidores e conseguindo lucrar com uma parte da energia que não seria utilizada. Com o uso de baterias, é possível ter um estoque em horários que não existe produção de energia elétrica proveniente de painéis fotovoltaicos ou ventos para produção de energia eólica. O armazenamento de energia pode contribuir mais esse possível cenário, podendo vender energia para entidades que possuem valores maiores de tarifas elétricas em certos horários, como pela Copel é definida entre as dezoito horas até vinte e uma horas fora do horário de verão.

Portanto, o Blockchain acaba sendo uma tecnologia que pode incentivar o aumento ainda mais de energias renováveis, em diversos níveis, tanto quanto residencial até em grandes empresas porque dá flexibilidade para que o excesso de energia possa ser vendido e comprado em um preço mais barato comparado com as concessionárias locais e a compra possa ser realizada e validade em questões de minutos, já que a média de construção de blocos é de 10 minutos. Além disso, o Blockchain elimina processos burocráticos devido a retirada de um intermediário centralizado, o próprio consumidor e o produtor de energia, podem realizar a transação diretamente e conseqüentemente acaba sendo mais prático e simples.

## 1.1 CONTEXTO

O surgimento do Blockchain em 2009 veio atrelado com a ideia de reinventar a moeda em forma de código computacional através de um usuário de fóruns de programação na internet chamado “Satoshi Nakamoto”. Essa moeda foi chamada de Bitcoin e a ideia por trás dessa moeda de acordo com (NAKAMOTO, 2009) é eliminar as deficiências inerentes de instituições em relação de modelo transacionais de confiança. Toda transação de Bitcoins fica registrada no Blockchain que é uma tecnologia de registro distribuído conhecido como “livro razão”, todas as transações realizadas até o momento ficam registradas no Blockchain. Gera benefícios como a criptografia, garantindo o anonimato dos participantes da rede, confiança já que o “intermediário” é um código matemático que seria incorruptível e por ser um código-fonte aberto e descentralizado, não existe um ponto central de falha.

Com o surgimento dessa tecnologia de eliminação de terceiros para realizar transações, diversas empresas e organizações começaram a criar seu próprio código de Blockchain e assim novas ferramentas surgiram como os contratos inteligentes (do inglês, *smarts-contracts*). Com essa difusão, algumas empresas como Energy Web Foundation e Power Ledger já estão lançando projetos pilotos para suportar aplicações no mercado de energia. Vale ressaltar que no Brasil, essa livre venda de energia só pode ocorrer em níveis de Montante de Uso de Sistemas de Distribuição (MUSD) muito alto, fora da realidade de um consumidor residencial. Para entrar no Ambiente de Contratação Livre (ACL) e poder comprar energia livremente, sem ser necessária a compra da concessionária, a empresa pode entrar em duas categorias: Consumidor Livre ou Consumidor Especial de acordo com as normas da Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE).

Para ser considerado um Consumidor Especial, de acordo com (CCEE, [s.d.]), deve possuir uma MUSD entre 0,3 MW ou 3 MW ou um conjunto de unidades consumidoras que cada uma seja igual ou maior a 0,03 MW reunidas no nome de uma Pessoa Jurídica que totalize pelo menos 0,5 MW. As energias contratadas permitidas seriam de PCHs usinas eólicas, solares ou biomassas de uma potência de no máximo 30 kW.

Existe apenas uma exigência para ser Consumidor Livre, é necessário apenas possuir uma MUSD igual ou maior a 3MW. Não existe restrição de energia contratada

e as compras são realizadas geralmente de grandes hidrelétricas que possuem um preço mais barato.

Com essa legislação de comercialização de energia no ACL, o Blockchain teria um impacto significativo em apenas em uma parcela da população, geralmente empresas ou unidades consumidoras reunidas em uma mesma Pessoa Jurídica. Em outros países que existem menos restrições para essa comercialização, como nos Estados Unidos, o Blockchain poderá ser mais aderido, conhecido e difundido podendo aumentar o fluxo econômico do país.

## 1.2 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho consiste em desenvolver um modelo computacional com Blockchain para armazenamento de energia em baterias em redes ativas de distribuição.

Os objetivos específicos são:

- Analisar ferramentas que podem ser utilizadas para simular o Blockchain.
- Análise do Estado da arte de aplicações, empresas que utilizam essa tecnologia e possuem plataforma para venda e compra de energia elétrica e artigos científicos que possuem a modelagem de um sistema elétrico com baterias e tecnologia Blockchain.
- Modelar a aplicação de Blockchain com cenários com o uso de baterias centrais e individuais em comparação com outro sem bateria e Blockchain e com outro com uso de baterias iguais ao primeiro, todos com modelo elétrico.
- Testar e validar o modelo mostrando os possíveis benefícios que a tecnologia Blockchain pode impactar economicamente na compra e venda de energia.

## 1.3 JUSTIFICATIVA

A tecnologia Blockchain surgiu no final da década passada com o intuito de melhorar a questão da confiança nas transações econômicas, transparência das empresas e segurança dos dados dos usuários. Está alterando o mercado econômico desde então, com o uso de criptomoedas, *smarts contracts* e venda e compra de energia. Aproveitando que o Blockchain abre uma oportunidade de realização de transações de energia de forma a criar flexibilidade e rapidez na comercialização, o

tema desse trabalho foi escolhido para demonstrar diversos cenários dentro de um sistema elétrico que possa ser visualizado economicamente e tecnicamente os benefícios do uso do Blockchain para armazenamento de energia em baterias em redes ativas de distribuição.

#### 1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

O capítulo um inicia a discussão sobre a realização do tema do trabalho, o contexto do surgimento do Blockchain e sua área de atuação, o objetivo que seria o desenvolvimento de um modelo computacional com Blockchain para armazenamento de energia e a justificativa de seu uso com baterias.

Os capítulos dois e três falam sobre conceitos técnicos dos parâmetros elétricos da engenharia elétrica e sobre o funcionamento da plataforma ponto a ponto (do inglês, *peer to peer* – P2P).

Já no capítulo quatro será feito a descrição dos softwares utilizados para a realização do modelo Blockchain integrado com armazenamento de energia e um sistema elétrico do *Institute of Electrical and Electronic Engineers* (IEE) para simular os cenários propostos. Também será mostrado nos métodos, como foi feito a arquitetura do mercado inserida no Blockchain e como foi feito a união do GridLAB-D e da plataforma Blockchain.

Capítulo 5 será mostrado o resultado da simulação feita e a comparação dos resultados de acordo com cada cenário proposto. Além disso, qual o impacto do Blockchain e na diferença entre os cenários que possuem o sistema ponto a ponto e da tipologia das baterias adequada para diferentes situações.

No último capítulo, será feito a análise de todo projeto, desde motivação do trabalho, contexto tecnológico até a comparação dos resultados dos cenários propostos, além de propor futuros projetos para manter continuidade do que já foi iniciado por este.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 BLOCKCHAIN

Neste capítulo, será abordado o contexto do surgimento, funcionamento do Blockchain e o seu impacto na confiança entre transações a partir de um terceiro descentralizado que é o Blockchain, que funciona como um caderno que registra todas as transações já feitas. Esse caderno é criptografado e é estruturado para que não sofra ataques externos e seja mais imparcial já que a confiança vem de código matemático.

#### 2.1.1 História

Conforme o (BUTERIN, 2015), o conceito de criptomoedas descentralizadas não surgiu na década passada com o surgimento do Bitcoin. Os *anonymous e-cash protocols* surgiram nos anos 80 e 90, atrelados com a primitiva criptografia chamada *Chaumian Blinding* condicionando a moeda um alto grau de privacidade, só que pela existência de um intermediário, acabou perdendo força e popularidade.

No final da década de 90, o cientista da computação Wei Dai, criou o b-money, sendo a primeira ideia a usar quebra-cabeças computacionais juntamente com consenso descentralizado, porém a proposta não era detalhada ao ponto de demonstrar como esse consenso poderia funcionar. Quase uma década depois, em 2005, Hal Finney surgiu com um conceito bem similar ao que é o Bitcoin, chamado *Reusable Proofs of Work* (RPOW). O RPOW possui o conceito de chaves públicas e privadas usados no Blockchain, só que não foi projetado para ser usado em uma grande escala, era apenas um protótipo de software sofisticado.

Em 2009, uma criptomoeda descentralizada finalmente foi implementada pelo Satoshi Nakamoto e outros diversos programadores envolvidos, combinando conceitos para gerenciar a propriedade através de criptografia de chave pública com um algoritmo de consenso para manter o controle de quem possui moedas, conhecido como Prova de Trabalho (do inglês, Proof of Work – PoW).

O mecanismo por trás da prova de trabalho foi uma medida revolucionária porque resolveu dois problemas. Primeiro, forneceu um algoritmo de consenso simples e eficaz, permitindo que os nós da rede concordassem coletivamente sobre

um conjunto de atualizações altura do bloco Bitcoin. Segundo, forneceu um mecanismo democrático para permitir à entrada no processo de consenso, resolvendo o problema de quem decidiria a influência do consenso, ao mesmo tempo em que previne ataques de cibernéticos. Historicamente, eram dois grandes problemas que dificultavam a criação de diversos cientistas da computação ao longo da história.

Já existem diversas criptomoedas e cada uma possui a sua valorização quando comparada com o papel-moeda. Seu valor está atrelado ao por que de sua criação e os benefícios que seu algoritmo de consenso gera, já que foram criados diversos outros além da PoW e cada um possui uma modelagem diferente a participação de cada nó na rede.

## 2.1.2 Criptografia e criptomoeda

A criptografia é essencial para que diversos parâmetros de segurança e transparência das transações ocorram de forma segura. Para isso ocorrer, a estrutura matemática que será abordada é essencial para ter a premissa dessa segurança.

### 2.1.2.1 Funções Hash

De acordo com o curso de Funções Hash são muito utilizadas no Blockchain, bastante essa função para criptografar diversas informações, não poderia existir esse sistema ponto a ponto.

A função criptográfica aceita qualquer tamanho de string de entrada, como é discutido em (PRINCETOWN, 2019). E produz uma mensagem de comprimento fixo como saída. A saída possui comprimento fixo, no caso do Bitcoin, a saída é de 256 bits. É eficientemente comutável, ou seja, dado uma mensagem de entrada, a função Hash deve produzir uma saída em um determinado tempo.

As propriedades de segurança da função Hash para autenticar e criptografar as mensagens devem ser livres de colisão, devem conseguir “esconder” o valor da mensagem e devem ser *Puzzle friendly*.

A primeira propriedade de ser livres de colisão implica basicamente que se a função Hash tem um valor  $x$  e outro valor  $y$  de entrada e os dois não forem idênticos, a função Hash de  $x$  ( $H(x)$ ) deve ser diferente da função Hash de  $y$  ( $H(y)$ ).

Porém, colisões existem, ou seja, dois valores distintos de entrada geram para uma mesma função Hash uma mesma string, e existe uma metodologia que sempre é possível achar essa colisão. É necessário testar  $2^{130}$  entradas aleatórias escolhidas e a probabilidade de achá-las é de 99,8%, caso não funcione na primeira tentativa, é praticamente inviável não funcionar na segunda vez. No entanto, o tempo de processo computacional para testar esse número de entrada é inviável para qualquer computador.

O Blockchain utilizou funções que ninguém conseguiu ainda achar uma colisão, podendo assumir que são livres de colisão. Por isso que as funções Hash, são úteis para verificar a integridade das mensagens, já que se algum bit da mensagem é alterado, a função resultante será diferente da original.

A segunda propriedade está relacionada à facilidade de se achar um valor de entrada em comparação com possíveis outros. Ou seja, dada um valor  $x$ , a função Hash tem que ser capaz de “esconder” em uma distribuição de probabilidade bem espalhada para que nenhum valor em particular seja escolhido não mais que uma probabilidade insignificante pequena em vista das diversas existentes. Portanto, dado uma  $H(x)$  a probabilidade de achar o  $x$ , através de uma função inversa, seja ínfima devido ao peso pequeno e o próximo possível para todos os valores de entrada.

A terceira propriedade infere que não deve existir uma estratégia para solucionar melhor do que tentar valores aleatórios de entrada. Na seção 2.1.3.2 será explicado que essa terceira propriedade é a base da PoW usado no Bitcoin.

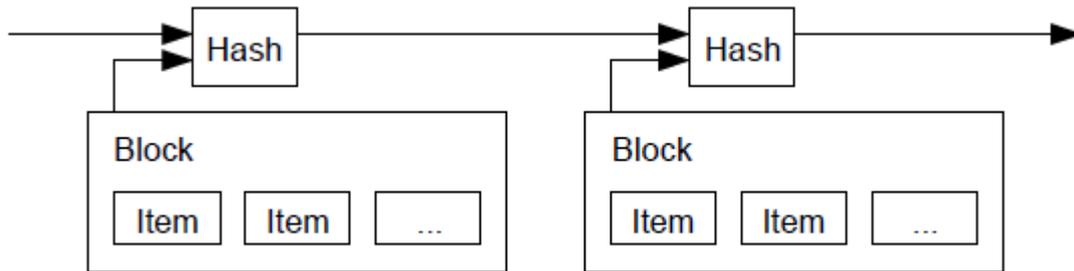
A função Hash utilizada para o Bitcoin é a SHA-256 é utilizada em grande parte do Blockchain como na assinatura digital e PoW que será ilustrado nas seções 2.1.2.3 e 2.1.3.2.

### 2.1.2.2 Hash Pointer e Estruturas de Dados

Apresentado em (PRINCETOWN, 2019), Hash Pointer tem uma função essencial para a integridade e construção do bloco. É basicamente um ponteiro para onde uma informação é armazenada e junto será usada uma função Hash para criptografar a informação. Um ponteiro de Hash permite resgatar que as informações e verificar se as informações não foram modificadas. Assim, um ponteiro nos diz onde algo está e qual é o valor dele, também guarda o Hash do valor que esses dados foram vistos por último.

A descrição de estrutura de dados é ilustrada na figura 1.

Figura 1 – Estrutura de dados com Hash Pointers



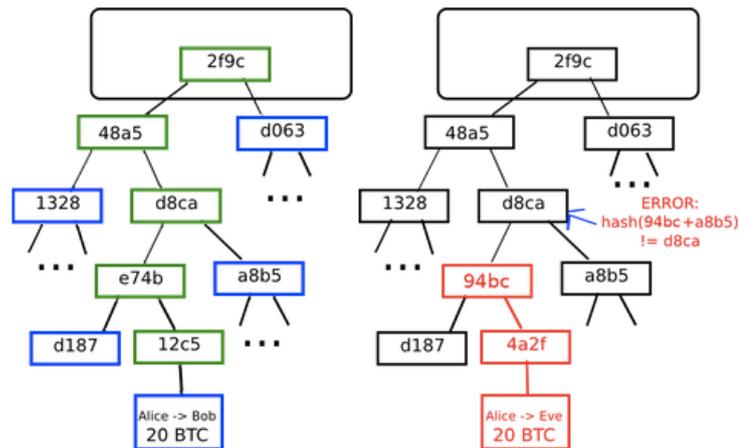
FONTE: White Paper Bitcoin (2009)

Hash Pointers no Blockchain é usado para criar estruturas de dados. Os ponteiros estão conectados com o Bloco anterior e assim existe uma estrutura de dados que contém informação do Bloco anterior. Basicamente em cada bloco da cadeia, possui um Hash do bloco anterior e se ocorrer modificação em um dos blocos, o Hash do bloco, que é o resultado da construção do mesmo pelo minerador, é alterado. Todos os blocos possuem esse Hash e o Hash do bloco anterior, se um Hash é alterado, todos os blocos a frente dele, se tornariam inválidos já que o Hash do bloco alterado foi modificado devido à propriedade das funções Hash que uma alteração na mensagem, a saída da função será totalmente diferente. Ou seja, com a alteração de alguma informação de um bloco, o Hash anterior do bloco seguinte terá uma *string* diferente do Hash que está apontando, invalidando toda sequência de blocos.

Essa estrutura de dados previne no Blockchain de sofrer ataques esporádicos de modificações de informações ao longo do tempo. Isso ocorre devido que se ocorrer uma modificação em um bloco no meio da cadeia de blocos, o Hash pointer irá indicar que existe uma diferença de um Hash com o Hash anterior do seguinte bloco e para que o invasor consiga obter sucesso, ele precisa minerar todos os blocos até o último da sequência. Se os blocos são minerados em uma média de 10 minutos aproximadamente, o invasor teria que minerar todos os blocos na frente do modificado em menos de 10 minutos, obtendo um poder computacional que é impraticável atualmente, o mesmo teria mais benefício em minerar blocos caso possuísse tal poder computacional.

*Merkle tree* é uma estrutura de dados que usa Hash Pointers em uma árvore binária usada no Bitcoin. A figura 2 ilustra o que foi descrito sobre *Merkle tree*.

Figura 2– Merkle tree



FONTE: *White Paper Ethereum* (2015)

. A ideia é usar os ponteiros para atrelar um novo bloco ao anterior para se definir um caminho a ser seguido e assim evitar fraudes. Porém, nas folhas da árvore, se encontram as transações realizadas (os dados) e acima os nós intermediários, que cada um terá um Hash da junção de dois nós abaixo dele, chamado de filho. Assim, a cada nó intermediário acima do anterior surgirá com a junção dos Hashs de seus filhos até chegar ao único nó raiz da árvore, representando o topo da *Merkle tree*. Se houver alguma transação falsa, o Hash do dado na base da árvore irá mudar e isso irá causar uma alteração no nó acima até a raiz da árvore.

Uma grande vantagem desse método é que para verificar se alguma transação foi alterada, basta apenas separar o caminho que esse dado se encontrar e “isolar” este da árvore para analisa-lo. O Hash anterior de cada bloco é fundamental para manter a integridade e alertar sobre algum bloco malicioso em escala mais global da cadeia, mas o uso dessa árvore ajuda a verificar mais rapidamente a validação de uma transação, já que é necessário apenas ver o caminho desde folha específica da árvore até a raiz dela como ilustra a figura 2.

As estruturas de dados é uma das importantes estruturas encontradas para manter a integridade do bloco e deixar prevalecer o consenso distribuído da rede.

### 2.1.2.3 Assinaturas Digitais

É discutido em (PRINCETOWN, 2019) que a assinatura no Blockchain possui algumas diferenças com a assinatura manual que é normalmente realizada em

contratos, recibos e outros exemplos. A assinatura não será a mesma sempre, ela vai variar de acordo com a mensagem e todos vão poder verifica-la para autenticação.

Para criar uma assinatura, é necessário criar uma chave secreta e uma chave pública. A chave secreta é uma chave que apenas o criador tem acesso ao seu conteúdo e a chave pública serve para comprovação da pessoa por trás da chave. As duas chaves podem ser criadas por funções randômicas para que não sigam nenhum padrão e consigam ser facilmente detectáveis. As duas chaves possuem um tamanho fixo após o uso da função Hash.

Após a criação das chaves publica e secreta, a assinatura de qualquer pessoa no Blockchain é uma função Hash que recebe como parâmetros a mensagem e a chave secreta. A equação 1 demonstra matematicamente o que foi descrito.

$$Sig = Sign(sk, message) \quad (1)$$

Onde *Sig* é uma *string* de bits que representa assinatura, *Sign()* é uma função que recebe dois parâmetros e gera uma assinatura, *SK* é a chave secreta e *message* é a mensagem criptografada que foi enviada.

Para a rede conseguir identificar a validade de algo que aparenta ser uma assinatura verdadeira, recorrem a uma função de verificação que retorna verdadeiro ou falso. A equação 2 demonstra quais parâmetros essa função recebe.

$$isValid = verify(pk, message, Sig) \quad (2)$$

Onde *isValid* retorna se a assinatura é forjada ou não, *verify()* é uma função recebe parâmetros para verificar a autenticidade da assinatura e *pk* é a chave pública.

Pode-se analisar que pela equação 1, a assinatura muda conforme a mensagem, portanto mesmo que todos possam ver a assinatura de uma determinada pessoa, não podem forja-la porque ela depende de dois parâmetros, a chave secreta e a mensagem. A primeira ninguém além do criador tem acesso e ela é feita a partir de algoritmos randômicos e a segunda é a mensagem será transmitida que pode ser criptografada através de uma função Hash para limitar seu tamanho. Esta é a responsável pela alteração das assinaturas toda vez que ocorre uma transação no Bitcoin, por exemplo, já que a chave secreta geralmente não se muda.

Vale a pena ressaltar que pode mudar a chave secreta e a publica podem ser mudadas de acordo com o desejo de cada pessoa, assim podem-se criar diversas identidades para alguém. Por um lado é ótimo porque pode notar ao longo do tempo perceber padrões comportamentais nas transações de uma chave pública e poder associa-la a uma pessoa conhecida fora do Blockchain, é muito difícil conseguir fazer

essa associação, porém é possível. Por outro lado, exigirá maior controle das chaves secretas dos usuários e um cuidado com as diversas identidades criadas.

No sistema do Bitcoin usa um padrão americano chamado *Elliptic Curve Digital Signature Algorithm* para assinaturas digitais.

### **2.1.3 Descentralização com Blockchain**

O Blockchain tem o intuito de retirar um terceiro centralizado e isso é realizado dando uma importância igualitária para todos os nós da rede, gerando uma democratização. Também será abordado da construção do bloco para manter a transparência e como é mantida a segurança das transações nos blocos.

#### **2.1.3.1 Protocolo de consenso distribuído**

Em relação ao Bitcoin, existe um objetivo principal que seria o anonimato de qualquer pessoa em transações e na rede. Isso ocorre devido as funções Hash citada na seção 2.1.2.1 deste documento.

De acordo com (PRINCETOWN, 2019), qualquer ponto, ou seja, qualquer pessoa pode criar um bloco, isso democratiza o Blockchain. Para o bloco ser validado, os outros pontos aceitam ou o recusam pelo consenso da rede. Se o bloco for rejeitado, ocorre o retorno ao bloco anterior e ocorre o mesmo processo de aceitação ou não de um próximo bloco.

O consenso é algo benéfico porque as informações de todas as transações do Bitcoin, por exemplo, estão na rede. Ou seja, todos os pontos possuem a informação verdadeira de tudo que ocorre. Se a maioria dos blocos forem não maliciosos, o consenso irá ajudar a criar a validar um bloco não malicioso ou a invalidar um malicioso.

#### **2.1.3.2 Construção e a manutenção da integridade do Bloco**

Diversos sites mostram as informações dos blocos, a figura 3 mostra algumas características do bloco 565976 criado na Blockchain do Bitcoin.



muito devido a pelos incentivos, que será explicado na seção 2.1.3.3, a rede tende a se comportar de forma honesta.

A terceira seria o gasto duplo, usando o mesmo Bitcoin para duas pessoas diferentes. Se um Bloco malicioso é criado por um nó desonesto, um dos dois usuários não será pago. Para garantir que um usuário será pago, o mesmo precisa esperar alguns blocos, geralmente utiliza-se seis, pois é uma boa amostragem, para realmente será pago, pois podem existir blocos em paralelo e o bloco referente a um desses dois usuários pode virar um bloco órfão, ou seja, a cadeia pode continuar por outro bloco. Esse gasto duplo pode ocorrer, mas isso é raro devido à existência de mais nós honestos e esses possuem registrados as transações verdadeiras.

### 2.1.3.3 Incentivos para a construção de um Bloco e mineração

Qualquer ponto da rede pode criar um novo bloco, porém apenas alguns nós se importam em competir por essa tarefa. Isso ocorre que para criar um bloco, é necessário resolver um Hash Puzzle, a terceira propriedade das funções Hash. PoW foi a escolhida no Bitcoin para realizar essa tarefa.

A Pow possui três propriedades, de acordo com (PRINCETOWN, 2019), a primeira é a dificuldade para calcular o Hash. Como não existe atalho para resolver esse Hash, então basicamente tentam-se valores aleatórios de entrada para ver se a saída da função é satisfeita. Como o bloco é constituído do seu número de tentativas para criar o bloco (*nounce*), do Hash anterior, e das transações, toda essa longa cadeia de *strings* deve entrar no Hash e existe apenas um espaço de destino (*target space*) de um de  $10^{20}$  Hashes por bloco. Ou seja, para um minerador (um usuário que cria o bloco) crie um bloco, ele precisa ter um poder computacional enorme para conseguir descobrir o output que atenderá a condição de *target space* e ainda depender da sorte já que existem diversos pontos e alguns desses outros podem achar primeiro, já que o conjunto de *strings* que representa as informações do bloco é aleatório, dado que o *nounce* muda de acordo com o número da tentativa.

A figura 4 mostra uma amostra de tempo do horário de criação de blocos em um determinado dia.

Figura 4 – Amostra de tempo de criação de cada bloco

Blocks	Transactions			
HEIGHT	TIMESTAMP	TRANSACTIONS	SIZE (KB)	WEIGHT (KWU)
565,963	3/6/2019, 9:17:35 PM GMT-3	2,226	1,340.932	3,998.078
565,962	3/6/2019, 8:57:46 PM GMT-3	1,573	1,320.452	3,993.024
565,961	3/6/2019, 8:52:22 PM GMT-3	2,362	1,231.123	3,992.873
565,960	3/6/2019, 8:45:24 PM GMT-3	2,675	1,267.082	3,997.875
565,959	3/6/2019, 8:32:25 PM GMT-3	2,453	1,095.251	3,997.917
565,958	3/6/2019, 8:30:37 PM GMT-3	2,655	1,263.196	3,992.69
565,957	3/6/2019, 8:20:05 PM GMT-3	1,324	554.833	1,714.67
565,956	3/6/2019, 8:13:56 PM GMT-3	2,850	1,301.076	3,992.902
565,955	3/6/2019, 7:49:10 PM GMT-3	2,635	1,226.301	3,992.884

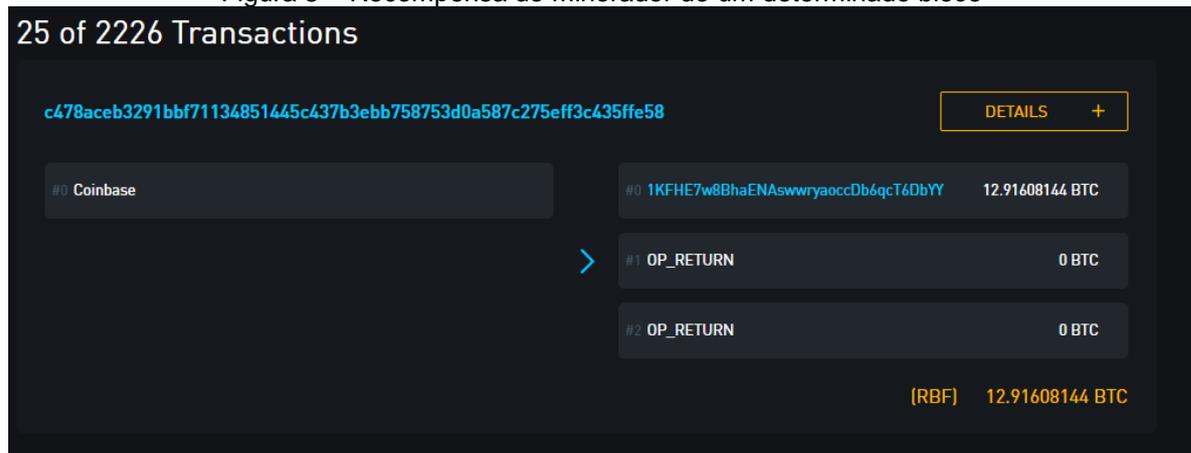
Fonte: <https://blockstream.info/> (2019)

A segunda propriedade está relacionada à figura 4, que a rede recalcula o *target space* a cada duas semanas com o intuito de deixar o tempo médio de construção de bloco em 10 minutos. Ao longo do tempo, mais mineradores surgirão para minerar os blocos e mais blocos inesperados irão surgir nesse período, além disso, o poder computacional de hardware pode aumentar e alguns nós podem conseguir diminuir o tempo para achar o *target space*. Com isso, os nós mudam o *target space* com o intuito de exigir mais poder computacional ainda para criar um bloco. O tempo de 10 minutos é escolhido justamente para gerar problemas de ineficiência e perderia os benefícios de otimização que seria colocar diversas transações dentro de um bloco. Se o tempo médio for maior de 10 minutos, seria muito longo para realizar uma transação, trazendo problemas de ineficiência também.

A terceira propriedade seria que o *nounce* é publicado junto ao bloco e isso dá o poder aos outros nós da rede de testar se esse *nounce* está condizente com o tamanho do *target space* estabelecido.

A figura 5 mostra a recompensa do minerador na criação de um determinado bloco.

Figura 5 – Recompensa do minerador de um determinado bloco



FONTE: <https://blockstream.info/> (2019)

Os mineradores recebem uma recompensa em Bitcoins, que serão criados junto com o surgimento do bloco, após atingir o *target space* e assim criar um bloco com diversas transações. Foi pensado em a cada vinte e um mil blocos aproximadamente, ocorrerá um corte pela metade de Bitcoins recebidos, nos primeiros vinte e um mil blocos eram cinquenta Bitcoins, nos próximos vinte e um mil cortou para a metade e assim por diante a cada vinte e um mil blocos. Além dessa recompensa, uma pequena porcentagem de cada transação vai para o minerador, somando ainda mais com esse valor de doze e meio Bitcoins atualmente. É possível ainda incluir uma parcela da transferência para o minerador na forma de uma “taxa gratuita”, recompensando-o ainda mais pelo trabalho. Isso é uma medida que vem aumentando e será necessário conforme a redução da recompensa ao longo dos anos, já que essa “taxa” será a prática para incentivar ainda os mineradores a minerar os blocos quando a recompensa apenas pela criação do bloco chegar a níveis mais baixos monetariamente.

Para explicar como a rede tende a se comportar de forma honesta, basta analisar que se a maioria dos mineradores, que somados possuem peso grande de Hash Power da rede, seguir o protocolo, dá uma certeza de pelo menos de 50% do próximo bloco não ser malicioso. A maioria dos mineradores terá essa grande parte do Hash Power da rede devido a essa competição existente para se criar um bloco, sendo necessário aprimorar cada vez mais o hardware e o surgimento contínuo de mineradores devido às recompensas em Bitcoins para se criar um bloco.

A equação três ilustra a probabilidade de um nó conseguir minerar um bloco e assim ilustrar melhor que a somatória da maioria dos minadores tem uma fração

grande de Hash Power e assim ter uma chance grande de um bloco criado ser honesto.

$$Prob(\text{criar um bloco}) = \text{fração do poder global de Hash por nó} \quad (3)$$

Onde  $Prob(\text{criar um bloco})$  é a probabilidade de minerar um bloco.

#### 2.1.4 Contratos inteligentes

Contratos inteligentes são contratos programáveis, ou seja, são escritos através de código de programação executados por computador ao invés de um contrato físico. De acordo com o (BUTERIN, 2015) o código pode definir tudo o que um contrato tradicional já realiza, como obrigações, benefícios e penalidades e através disso seguir as sequências de regras e etapas as quais foram estabelecidas. Isso possibilita a negociação entre duas pessoas que não se conhecem sem um intermediário centralizado. O Blockchain acaba sendo “um intermediário” que lança o contrato na rede e se ocorrer um descumprimento de alguma das partes, o contrato estará como prova, caso o prejudicado procure ser ressarcido, no livro-razão sem a possibilidade de ser retirado e o próprio contrato pode prevenir de algum prejuízo da outra parte através de suas estruturas condicionais que estarão no código.

O Bitcoin não possui contratos inteligentes em seu Blockchain, para essa seção, será utilizado como referência a Ethereum Foundation, que possui uma grande notoriedade no mercado Blockchain em relação a contratos inteligentes. Para poder explicar como chamar ou criar um contrato, é necessário entender as diferenças existentes estruturais entre os dois.

Em Ethereum, o estado é composto de objetos chamados "contas", cada conta tem um endereço de 20 bytes e transições de estado sendo transferências diretas de valor e informação entre contas. Existem basicamente duas contas, a primeira é chamada de *external owned account* controlada por chave privada, não possui código, pode enviar mensagens de uma conta desse tipo a outra pela criação e a assinatura de uma transação. A outra seria a conta de contrato, toda vez que esse tipo de conta recebe uma mensagem, seu código é ativado, permitindo que ele leia e grave no seu armazenamento interno e envie outras mensagens ou crie contratos.

Uma conta Ethereum possui basicamente quatro campos. O primeiro é o *nounce* que se a conta for de propriedade externa, esse número representa o número

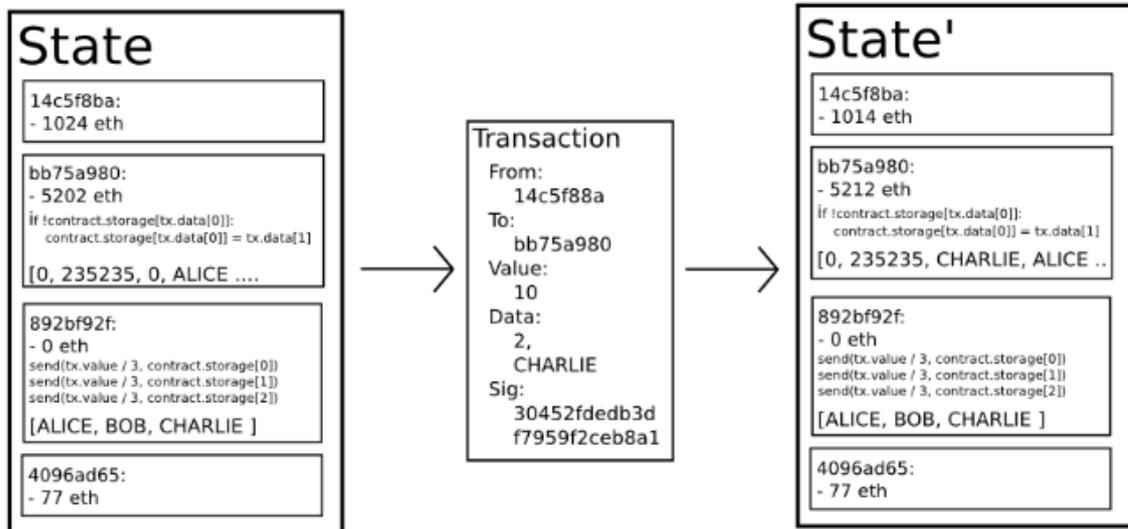
de transações enviadas do endereço da conta e se a conta for uma conta de contrato, o *nounce*, neste contexto, é o número de contratos criados pela conta. O segundo é atual saldo de Ether que existe na carteira, sendo o Ether a criptomoeda existente, o equivalente do Bitcoin na Ethereum. O terceiro seria o código do contrato se existente, se for efetuado apenas uma transação, não existirá o contrato. Por último, existe o armazenamento da conta, um Hash de 256 bits do nó raiz de uma *Merkle tree* (citada na seção 2.1.2.2) que codifica o conteúdo de armazenamento da conta (um mapeamento entre valores inteiros de 256 bits). A *Merkle tree* codifica o hash do conteúdo de armazenamento dessa conta e é vazia por padrão.

Os contratos tem a capacidade de mandar mensagens para outros contratos. Essa mensagem é composta basicamente por cinco itens. O primeiro é o endereço de quem mandou a mensagem, o segundo é o destinatário, o terceiro é a quantidade de Ethers que será transferido junto com a mensagem, o quarto é um campo de dados opcional e para finalizar, o quinto item se refere ao *STARTGAS*, inicializa um limite de quanto poder computacional de execução de código pode ser usado.

A *Ethereum state function* que faz a verificação de transição e é estruturada de acordo com a figura 6. possui passos para validar uma transação e calcular todos os parâmetros a serem executados e será descrito nos cinco itens.

A figura 6 ilustra a estrutura do *Ethereum state function*.

Figura 6 - Ethereum state function



FONTE: White Paper Ethereum (2015)

A *Ethereum state function* possui passos para validar uma transação e calcular todos os parâmetros a serem executados e será descrito nos cinco itens a seguir. Primeiro, seria a checagem para ver se a mensagem está formulada corretamente (possui o número certos de valores), verifica se a assinatura é válida e o *nounce* é o mesmo do transmissor, se algo for inválido, é retornado um erro. Segundo, calcula o preço da transação, que seria o *GASPRICE* x *STARTGAS* (*GASPRICE* seria o preço de Ether por passos computacionais) e determina o endereço da assinatura do transmissor da mensagem, tirando já do saldo de Ether da conta do transmissor. Terceiro, inicializa o *STARTGAS* e tira certa quantidade de gás por byte para pagar pelos bytes da transação. Quarto, transfere-se a mensagem da conta de quem a criou para o destinatário, se a conta receptora fora um contrato, ocorre a execução do código do contrato até a conclusão ou até que a fique sem combustível. Quinto, se ocorreu falha na transferência, o remetente não tem dinheiro suficiente ou acabou o combustível na execução do código.

Na Ethereum, o Blockchain foi construído em uma linguagem chamada Turing Complete, segundo a documentação da (ETHEREUM, [s.d.]), que permite qualquer pessoa escrever um contrato inteligente com suas próprias regras arbitrárias e com impossibilidade de alteração depois de feito o contrato, impossibilitando fraudes. Já os contratos inteligentes são programados em Solidity, uma linguagem orientada a objeto que foi influenciada pelas linguagens Python, C++ e JavaScript e foi estrutura para se compatível com a Ethereum Virtual Machine (EVM).

A figura 7 mostra um exemplo de um contrato feito para ilustrar todos os conceitos discutidos nessa seção que são essenciais para conseguir programar um contrato inteligente no Blockchain. O contrato foi simulado na plataforma Remix da Ethereum, em que é possível simular como seriam escritos os contratos inteligentes.

Figura 7 – Exemplo de contrato inteligente

The screenshot shows the Remix IDE interface. On the left, the Solidity code for a contract named 'test' is displayed:

```

1 pragma solidity ^0.5.0;
2
3 contract test
4 {
5     function multiplicacao(int256 value_1, int256 value_2) public pure returns(int256)
6     {
7         return value_1 * value_2;
8     }
9 }
10

```

Below the code, a transaction details table is shown:

transaction hash	0xc661c96ae987cce9dd67d0bbf53de1a8bf0e11a9c697e019b9d0a6f8a92586d3
from	0xca35b7d915458ef540ade6068dfef2f44e8fa733c
to	test.multiplicacao(int256,int256) 0x692a78d2e42a56d2c6c27aa97d1a86395877b3a
transaction cost	21982 gas (Cost only applies when called by a contract)
execution cost	326 gas (Cost only applies when called by a contract)
hash	0xc661c96ae987cce9dd67d0bbf53de1a8bf0e11a9c697e019b9d0a6f8a92586d3
input	0xa1d...0000c
decoded input	{ "int256 value_1": "3", "int256 value_2": "12" }
decoded output	{ "0": "int256: 36" }
logs	[]

On the right side of the interface, there are controls for the environment (JavaScript VM), account (0xca3...a733c), gas limit (3000000), and value (0 ether). Below these are buttons for 'Deploy' and 'call'. A 'Deployed Contracts' section shows the 'multiplicacao' contract with input fields for 'value\_1' (3) and 'value\_2' (12), and a 'call' button.

FONTE: O Autor (2019)

### 2.1.5 Aplicações com Blockchain

De acordo com (BUTERIN, 2015), existem majoritariamente três tipos de aplicações do Blockchain da Ethereum. A primeira seria aplicativos financeiros, oferecendo aos usuários melhores jeitos de gerenciar e entrar em contratos usando o seu próprio dinheiro. Isso inclui contratos de hedge, carteiras de poupança, testamentos e até mesmo algumas classes de contratos de trabalho em larga escala. A segunda seria a aplicação semi-financeira, onde o dinheiro está envolvido. Um exemplo perfeito são recompensas auto-executivas para soluções de problemas computacionais. A terceira seria o uso de aplicativos como votação on-line e governança descentralizada que não do âmbito financeiro.

Existem aplicações já consolidadas de uso do Blockchain e quatro dessas aplicações são listas abaixo de acordo com (MARR, 2018).

L03 é uma *startup* que construiu uma *microgrid* no Brooklyn em Nova York que registra todas as transações envolvidas na rede usando o Blockchain e faz o

ajuste de preço de compra e venda da energia diretamente da fonte dinamicamente ao longo do dia.

Uma empresa chamada B2Expand que possui uma base no Blockchain da Ethereum, cria videogames *cross-gaming*.

Spotify o serviço de streaming de música adquiriu a startup de Blockchain Mediachain Labs, o que ajudou a desenvolver soluções através do banco de dados descentralizado que pudesse melhor conectar artistas e acordos de licenciamento com as faixas disponíveis.

Guts é um sistema de bilheteria de ingressos que usa o Blockchain para evitar a fraude de ingressos.

Warranteer é um aplicativo Blockchain que permite aos consumidores, terem acesso sobre as informações dos produtos que foram adquiridos e ter assistência em caso de mau funcionamento.

## 2.2 ARMAZENAMENTO DE ENERGIA EM BATERIAS

Neste capítulo, serão discutidos alguns parâmetros da bateria e como eles afetam e moldam a construção desse dispositivo de armazenamento de energia.

### 2.2.1 Conceitos gerais

De acordo com (CHAGAS, 2007), as baterias são feitas para armazenar energia elétrica e descarrega-la quando for necessário de maneira controlada. Outra função que a bateria deve ter é de descarregar toda energia sem perdas, ou seja, entregar toda energia armazenada a uma determinada carga.

A capacidade de carga de uma bateria é o produto da corrente de descarga com o tempo de descarga. Essa energia acumulada depende da temperatura no ambiente, tensão final de descarga e da corrente utilizada. É importante salientar os três parâmetros descritos anteriormente, porque com o aumento de temperatura acima de 30°C e menores tensões de descarga, por exemplo, ocorre diminuição da vida útil da bateria. Ao longo do tempo de uso da bateria, ocorre a perda de capacidade das baterias e quando a diferença entre a capacidade inicial e a atual chega a 20% esta chegou ao fim de sua vida útil.

Profundidade de descarga é um parâmetro determinante para a vida útil de uma bateria. A bateria poderia ser descarregada até que a diferença de potencial fique nula entre os terminais positivo e negativo. Porém, a vida útil da bateria iria diminuir muito rápido porque essas descargas “profundas” formam uma camada irreversível de cristais de acordo com a tipologia de bateria. Para evitar que isso ocorra, existe uma limitação de potencial de descarga. Portanto, a profundidade de descarga é o percentual de carga retirada em uma determinada descarga, ou seja, quando a profundidade de descarga é 0%, não se descarregou nada e se o percentual de descarga é de 100%, a bateria está sem carga. Será usada como exemplo de uma bateria de chumbo-ácido a 25 °C para mostrar de quanto essa profundidade de descarga afeta a vida útil da bateria:

- 150 a 200 ciclos com 100% de profundidade de descarga.
- 400 a 500 ciclos com 50% de profundidade de descarga.
- 1000 ciclos com 30% de profundidade de descarga.

Um conceito também importante das baterias é a capacidade de fornecer a capacidade de avaliação de energia elétrica, isso é chamado de estado de carga (do inglês, *state-of-charge* – SOC). SOC analisa a quantidade de carga no instante em questão da bateria em detrimento com a quantidade total quando a bateria está totalmente carregada, através de uma razão. Através desse cálculo, é possível de saber o alcance de operação de uma determinada carga.

### **2.2.2 Tecnologias de armazenamento**

O trabalho de conclusão de curso parte da premissa de análise de armazenamento de energia em sistemas renováveis, dito isso, com o enorme custo econômico que (BANGUERO et al., 2018) cita no artigo em questão, um método de controle de carga e sua estratégia de controle são necessárias para proteger as baterias das descargas e cargas sofridas ao longo de suas vidas úteis.

A eficiência do método usado para o controle vai depender da corrente elétrica usada no carregamento, como vai se comportar as oscilações da corrente na rede, o tempo para carregar e os diversos valores de temperaturas lidas durante o

carregamento. Existem ainda, parâmetros de baterias citados no capítulo anterior que exigem um controle mais sofisticado que os tradicionais.

O principal objetivo de controladores de carga é aumentar o estado de carga, claro que outras especificações como vida útil, tempo de carregamento, proteção de bateria e profundidade de descarga são úteis, porém o controlador de carga tem por objetivo aumentar o SOC. Sabe-se que o processo de carregamento de baterias não é linear, existem diversos métodos que foram desenvolvidos para controlar efetivamente o carregamento de bateria. Alguns métodos existentes tradicionais em baterias para aplicação de energias renováveis são:

- *Constant current*
- *Constant voltage*
- *Two-step charging*
- *Pulse charging*
- *Reflex charging*
- *Trickle charge*
- *Float charge*

O método *Constant current* consiste em carregar a bateria em uma corrente constante, limitando a corrente evitando uma sobrecarga inicial. Sabendo que a tensão não é controlada, existe uma preocupação em evitar que a bateria chegue a uma tensão alta que provoque estragos tóxicos ou corrosão da rede que está instalada. O valor da tensão vai depender da corrente que será definida para o carregamento e isso facilita o cálculo do tempo de carregamento e do SOC. Como geralmente a tensão não é controlada, o que pode ocasionar sobrecarga na bateria e aumento da temperatura e isso ocasiona em uma degradação da vida útil da bateria. Porém esse método garante que todas as células conseguirão recarga total em cada ciclo.

*Constant voltage* é um método muito utilizado para carregamento de baterias, aplicando uma tensão constante nos terminais dela. Durante o início do carregamento, a corrente de carga é alta, quase atingindo o limite e ficará com esse valor até a bateria atingir um valor pré-definido de ajuste de tensão, então a corrente começará a diminuir exponencialmente até atingir um valor muito baixo. Ao final do processo, com a grande diminuição exponencial da corrente, o tempo de carga acaba aumentando exponencialmente também, o que torna este processo muito demorado,

principalmente nesta parte final. Este método é utilizado em aplicações que exigem períodos grandes de carregamento para atingir a carga máxima. Devido a esse longo tempo, pode causar aumento da temperatura e causar aumento da temperatura.

O método *Two-step charging* é um método que combina carregamento em corrente contínua (CC) e tensão constante (CV), inicia-se primeiro com o carregamento em CC até que a tensão da bateria atinge um estágio inicial de sobrecarga ou em uma tensão pré-definida. No segundo estágio passa-se a usar a tensão constante para carregar a bateria e evitar sobretensão. Este método é o mais eficiente em baterias, independentemente do tipo de bateria e é o método de controle mais difundido por ser mais rápido que o método CV. Entretanto, sua velocidade de carregamento e sua eficiência são baixas. Esse método não possui carregamento rápido devido a etapa CV e ainda pode causar aumento de temperaturas e redução do ciclo de vida da bateria.

*Pulse-charging* é um método de carregamento que se aplica uma corrente pulsada na bateria. As baterias acabam sendo carregadas e descarregadas totalmente em períodos permitindo que a tensão fique mais estável. É importante levar em conta que a frequência de carregamento, largura do pulso e pico de pulso, já que estes são parâmetros relacionados à capacidade de carregamento. Por deixar a tensão mais estável, evita-se o aumento de temperatura. A dificuldade de implementar esse método, é a complexidade para criá-lo.

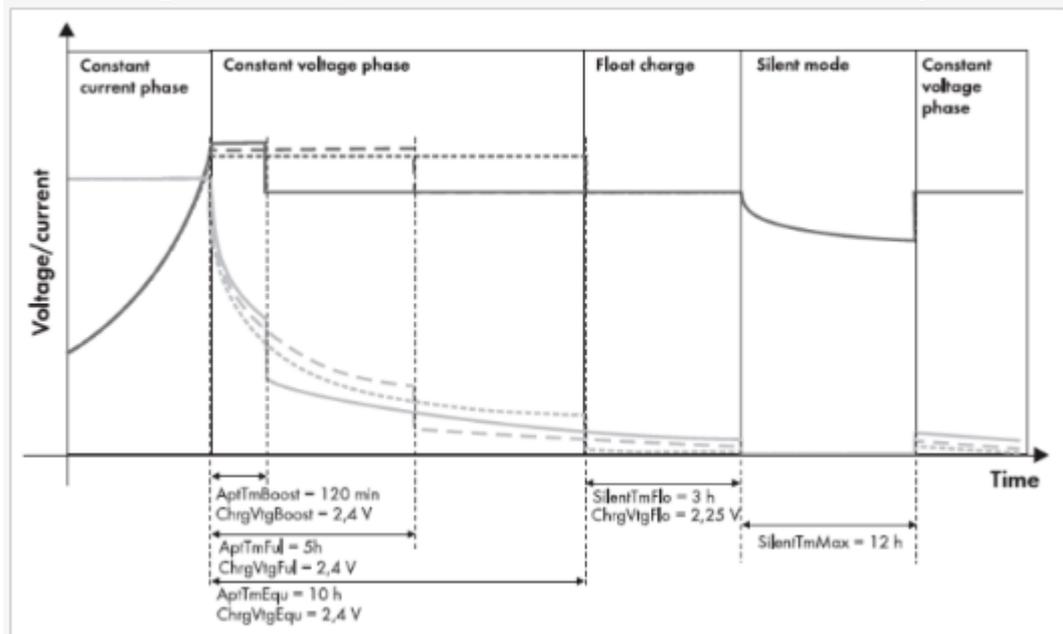
O *Reflex-charging* é um método aprimorado do *Pulse-charging*. Segue uma sequência de carregamento, recebe um pulso de carga positivo, um período de “descanso” e um pulso de descarga. Este método pode eliminar a polarização de modo que se reduzisse o aumento de temperatura, porém, esse reduz a eficiência de carregamento.

*Trickle charge* este consiste em fornecer uma carga à bateria de corrente contínua muito baixa. Foi desenvolvido para compensar a descarga automática da bateria. É possível carregar 100% a bateria usando uma corrente de carga muito baixa. Usada em baterias de partida, iluminação ou ignição, mas não é apropriada em baterias que são suscetíveis a danos oriundos de sobrecarga.

Este método envolve uma carga que será carregada com um valor de tensão contínua para apenas ser suficientemente apto a terminar a carga da bateria ou para mantê-la. É utilizado para baterias estacionárias, principalmente em baterias de chumbo-ácido.

A figura 8 mostra o controle da carga em três fases, CC, CV e *Float charge* em uma dada amostra de tempo da tecnologia *Solar Island* que utilizou esses métodos de controle de carga em inversores comerciais.

Figura 8 – Exemplo de métodos descritos em um intervalo de tempo

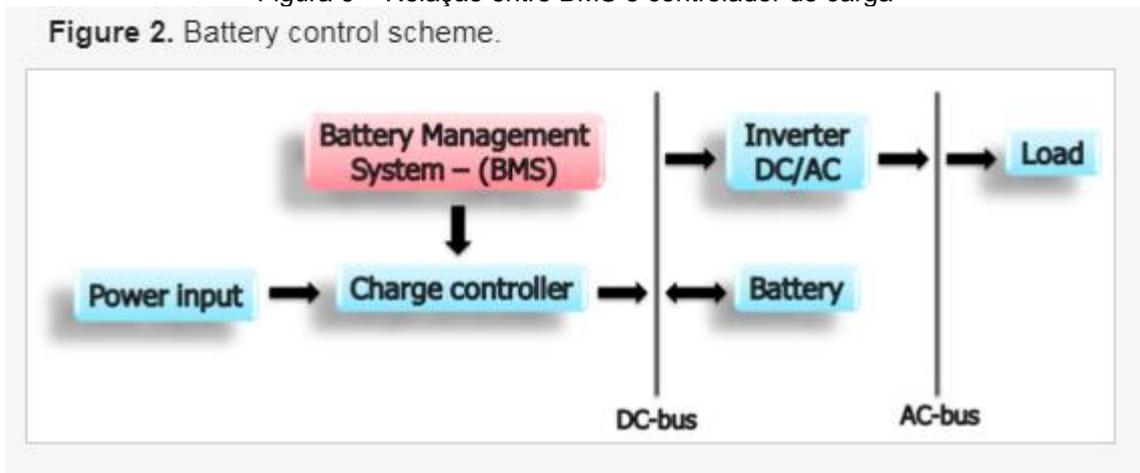


FONTE: <https://www.mdpi.com/1996-1073/11/4/1021/html> (2018)

Devido a toda uma complexidade existente em todo esse processo de descarregamento e carregamento da bateria, é necessário um gerenciador desse sistema para que isso ocorra seguindo os métodos ou a mescla dos mesmos, o sistema de Gerenciamento de Bateria (do inglês, Battery Management Systems – BMS).

A figura 9 mostra através de um fluxograma, como é a relação do BMS e dos controladores de carga em um ambiente de energia solar.

Figura 9 – Relação entre BMS e controlador de carga



FONTE: <https://www.mdpi.com/1996-1073/11/4/1021/html>

É citado em Moseley e Garche (2015), um sistema BMS para conseguir fazer seu gerenciamento de forma mais eficaz possível, necessita de sensores para medir corrente, tensão e temperatura. Além disso, para realizar o tratamento de dados e tomar a decisão para o gerenciamento do sistema é necessário uma unidade de armazenamento e de controle conjuntamente com dispositivos eletrônicos de potência capazes de delimitar a carga ou descarga e também de controle de nível de tensão e corrente para que a bateria fique em uma região segura de operação.

Com a expansão da microeletrônica nos últimos anos, o menor custo, o tamanho reduzido e sensores de alta precisão ajudaram a difundir esse sistema de gerenciamento no mercado de baterias.

Dois métodos de controles usados em baterias de sistemas fotovoltaicos usados no controle do gerenciamento de um sistema BMS de acordo com (BANGUERO et al., 2018).

*Fuzzy Logic Control (FLC)* é uma técnica que é oriunda da lógica de *fuzzy*, em que o controle *fuzzy* (do inglês, *fuzzy control* – FC), obteve sucesso ao longo dos anos ao trabalhar com sistemas não lineares ou não analíticos. Portanto, o FLC é um modelo composto por uma base de conhecimento na qual seus parâmetros podem ser determinados sem um modelo determinístico do sistema.

*Model Predictive Control (MPC)* oferece um método de controle que fornece sequência de variáveis ótimas ao longo de um determinado intervalo de tempo definido, que resolve qualquer problema de otimização, sendo aplicado em diversos campos que necessitem de controle.

Os dois podem aplicados em cenários com uso de energia renovável com armazenamento de energia isolado ou conectado a rede. O FLC e MPC mostram ter um melhor desempenho em relação aos métodos tradicionais citados em relação ao gerenciamento de carga, ou seja, melhora a eficiência do carregamento, SOC, vida útil da bateria e tempo de carregamento.

Existem diversas empresas que produzem seu próprio software e hardware para aplicação desse gerenciamento de sistema, nas mais diversas áreas, como automóveis e baterias de energia solar. Alguns exemplos de empresas que utilizam o sistema BMS: AVL Electrification, LION Smart e FoxBMS.

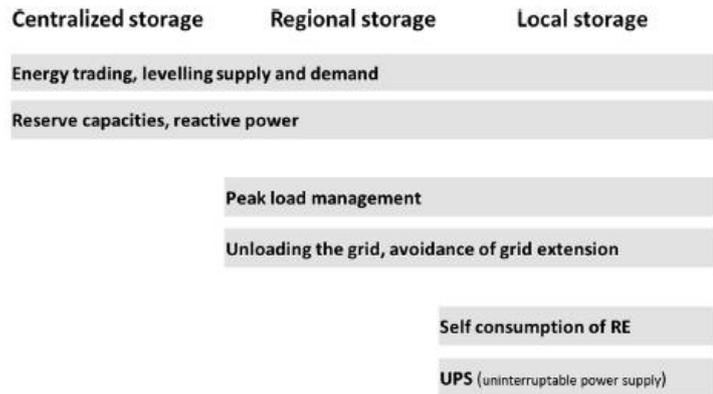
### **2.2.3 Armazenamento em pequeno, médio e grande porte**

Para os Moseley e Garche (2015), a principal característica de um sistema de armazenamento de energia é a sua classificação na rede e sua oferta de serviço, ou seja. Os sistemas de armazenamento possam, portanto, serem classificados de acordo com o serviço que podem oferecer a rede, os mercados de energia que entram e os operadores locais do sistema de armazenamento. Um parâmetro usado para mensurar ciclos de descarga de uma bateria é o *Power to Energy* (P2E), para altas taxas de PSE indicam tempos de descargas curtos. Porém, quando o sistema tem uma alta taxa de PSE, o sistema pode atingir grandes números de ciclos de descarregamento, enquanto baixas proporções possuem uma limitação nesse menor de ciclos de descarregamento. Se for olhar pelo viés econômico, baterias de maiores ciclos tendem ser mais atrativas.

A figura 10 mostra serviços que são oferecidos de acordo com os níveis da rede.

Figura 10 – Serviços oferecidos por nível de rede

FIGURE 2.4 Different services, which can be offered by storage systems on different grid levels to the grid and the power market.



FONTE: Moseley e Garche (2015)

O sistema de armazenamento centralizado (do inglês, *centralized storage system*), são instalações de grande porte como hidrelétricas, ou seja, para aplicações em níveis industriais mais altos. As tecnologias de armazenamento desse nível estão crescendo ao longo dos últimos anos e com uma diminuição do custo com um aumento na capacidade de armazenamento.

Os sistemas de armazenamento local (do inglês, *local storage systems*) e armazenamento regional (do inglês, *regional storage systems*) são tecnologias de armazenamentos mais comuns. São feitas de pequenas unidades, geralmente residenciais, e possuem uma capacidade maior é atingida quando se juntam pequenas residências em uma unidade só, como um bairro ou condomínio através de Pessoa Jurídica. A diferença principal entre os dois é que os sistemas de armazenamento locais devem ser mais baixos possíveis para evitar grandes custos de manutenção e os sistemas armazenamento regionais são maiores e lidam com custos de manutenção grandes em comparação com os sistemas locais de armazenamento.

Se for considerado um cenário com diversas cargas pequenas agrupadas e com um sistema de controle e armazenamento virtual inteligente, os sistemas de armazenamento locais poderiam prover de todos os serviços que os outros dois teriam, já que não existiria um alto custo de manutenção devido a inteligência do sistema. Entretanto, o contrário não ocorre, devido à impossibilidade de sistemas centralizados de armazenamento não poderem diminuir a carga na rede de distribuição, por exemplo. Isso ocorre devido às limitações de capacidade de transmissão e devido aos transformadores entre dois níveis definidos de tensão, limitando o fluxo de energia que é transmitido.

Esse fato pode ser muito corroborativo com o tema deste trabalho de conclusão de curso já que serão simulados dois cenários com uso de bateria individual e coletiva e se estes possuírem um sistema de controle inteligente, o sistema local de controle poderá dar uma viabilidade de construção de modelo com mais consumidores e *prosumers*.

Apesar dos custos de energia serem maiores em pequenas aplicações, modelos descentralizados de armazenamento de sistemas locais e regionais são necessários porque integram sistemas de energias renováveis e passam a trocar essa energia ao longo da rede.

A categorização é importante nesse cenário devido aas características que o sistema a ser feito possui. Cada uma possui uma capacidade de armazenamento e configuração de sistema que com seu serviço possa adotado o melhor sistema possível.

Resumindo, para aplicações em nível industrial, de maior porte, os sistemas centralizados são mais viáveis e usados. Para aplicações em menores escalas, uma aplicação de bateria coletiva, como por exemplo, em um condomínio ou um bairro, a aplicação de sistemas regional de armazenamento seria uma boa solução. E por fim, uma aplicação em diversas residências com baterias individuais.

Também é importante lembrar que a taxa de PSE mostra também um parâmetro a ser pensado quando for aplicar essas baterias em cada um dos cenários descritos, já que possuem menores números de ciclos, as baterias serão trocadas mais frequentemente e isso entrará no preço a ser pago para cada consumidor, sendo pessoa física ou jurídica.

### 2.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

O capítulo em questão serviu para situar quais são os parâmetros importantes de uma bateria para assim poder entender como esta vai se comportar em um sistema modelado que este trabalho apresentará. É importante salientar que o comportamento desta será levado em conta na simulação e que isso se baseia na prevê discussão feita de seus aspectos gerais e não em um detalhe minucioso e construtivo. A classificação a partir do tempo de descarregamento delas também é importante para atrelar a informação técnica discutida no nas duas primeiras seções do capítulo com a última e partir com a premissa de modelo mais próximo de uma realidade. Portanto,

foi pensando em unir esses conhecimentos para poder realizar a simulação de uma forma um pouco mais minuciosa.

### 3 REVISÃO DA LITERATURA E TECNOLOGIA

#### 3.1 REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo será abordado como foi feito o processo de seleção do portfólio bibliográfico e serão destacados também os principais fatores que cada artigo escolhido pelo processo pode contribuir para o desenvolvimento deste trabalho.

##### 3.1.1 Processo de seleção de portfólio bibliográfico

Esta etapa teve início através do levantamento do estado da arte relacionado ao tema em questão que é armazenamento de energias em baterias e Blockchain. Assim, iniciou-se a coleta de artigos científicos através do Portal de Periódicos da Capes, disponibilizado pelo Ministério da Educação (MEC). A partir disso, iniciou-se a coleta de artigos científicos selecionados a partir de sua fonte de publicação.

Em relação aos critérios de seleção para uma coleta de artigos científicos, foi levado em consideração uma combinação de palavras dos temas armazenamento de energia e Blockchain. A combinação de palavras escolhida foi *Battery Storage System* e Blockchain.

Para fazer a seleção inicial dos artigos com a combinação de palavras citada, foi utilizado o software Publish or Perish, que permite escolher diversos parâmetros, mas os utilizados foram qual a fonte de pesquisa, no caso Google Scholar, os anos de seleção de publicação dos artigos selecionados, no caso de 2008 a 2019 e as palavras selecionadas. Após selecionar esses parâmetros, o programa classifica primeiramente por citações que o artigo obteve e o limita a procura a partir de mil artigos. Ao terminar a seleção, a lista obteve novecentos e setenta e três artigos.

Depois da seleção de dados, iniciou-se a fase de pré-análise 1, em que será feito o corte de artigos que não foram publicados em base de dados pré-estabelecidos e as revistas científicas escolhidas foram: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), Elsevier, Scopus, Web of Science, Science Direct, Springer e Wiley. Essa etapa cortou para trezentos e oito artigos restantes.

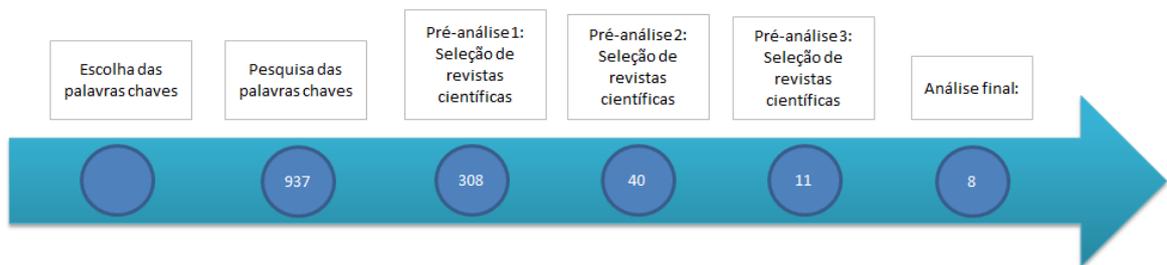
Posteriormente vem a pré-análise 2, em que consiste em eliminar os artigos que não possuem as duas palavras chaves no título que levou a lista para quarenta artigos restantes.

A última parte de pré-análise, que seria a pré-análise 3, é a leitura de Abstract, selecionando os que possuem a pesquisa que ajudaria a fundamentação com a proposta desse trabalho. Após a pré-análise 3, a lista ficou com onze artigos.

A análise final é a leitura completa e a exclusão de arquivos de congresso, sobraram dos oito artigos para auxiliar no desenvolvimento deste trabalho.

A estratégia de coleta de dados e análise de artigos científicos é mostrada na figura 11.

Figura 11 – Método de seleção de artigos científicos



FONTE: O autor (2019)

A tabela 1 apresenta o portfólio dos arquivos selecionados.

Tabela 1 – Seleção de portfólio

	Títulos dos artigos base para a pesquisa	Revista
1	Local electricity market designs for peer-to-peer trading: The role of battery flexibility	Applied energy
2	Multi-class energy management for peer-to-peer energy trading driven by prosumer preferences	IEEE Transactions on Power Systems
3	Community energy storage: A responsible innovation towards a sustainable energy system?	Applied energy
4	Peer-to-peer energy sharing through a two-stage aggregated battery control in a community Microgrid	Applied energy
5	Optimizing rooftop photovoltaic distributed generation with battery storage for peer-to-peer energy trading	Applied energy
6	Multi-Use of Stationary Battery Storage Systems with Blockchain Based Markets	Energy Procedia
7	Prosumer integration in wholesale electricity markets: Synergies of peer-to-peer trade and residential storage	Energy and Buildings
8	Peer-to-Peer Energy Trading in a Prosumer Based Community Microgrid: A Game-Theoretic Model	IEEE Transactions on Power Systems

FONTE: O autor (2019)

Após a seleção do portfólio bibliográfico apresentado na Tabela 1, viu-se necessário em ver a qualidade da produção científica do processo de portfólio realizado para escolher os artigos de referência. Os parâmetros selecionados para ilustrar os indicadores bibliográficos estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Índices bibliométricos

Índices bibliométricos	Valores
Ano de publicações	2018 - 2019
Total de artigos	8
Total de citações	23
Citações por ano	23
Citações por artigos	2,88
Citações por autores	7,78
Artigos por autores	2,23
Autores por artigo	3,88
Índice H	4

FONTE: O autor (2019)

### 3.1.2 Análise da literatura

Segundo Koirala, Oost e Windt (2018), as comunidades locais de compartilhamento de energias estão aparecendo mais em publicações desde 2010, o ano escolhido de início de estudos dos autores. O estudo feito pelos autores aborda mais sobre os papéis desempenhados pelas comunidades de armazenamentos de energia (em inglês, *community energy storage* – CEI). Além de informar conceitos e definições sobre esse tipo de compartilhamento de energia, são abordados nos níveis existentes, projetos em estágio inicial de desenvolvimento envolvendo CEI e suas aplicações possíveis no novo cenário de descentralização com o surgimento desse tipo de tecnologia como o Blockchain. É um artigo que faz um mapeamento do tema de CEI, explica os tipos existentes, sua importância, divisões e projetos pilotos ao redor do mundo que usam essa tecnologia.

Foi desenvolvido pelos (LÜTH et al., 2018), um estudo comparativo visando três cenários em dois tipos de situação, com ou sem a compra e venda de energia usando transações ponto a ponto. O primeiro cenário é sem armazenamento de energia, o segundo usando armazenamento descentralizado (individual) e o terceiro usando armazenamento centralizado (compartilhado). Foram levados em conta perfis de comportamentos de cargas, produção de energias renováveis e armazenamento de energia em algumas casas exemplos que foram parâmetros para o estudo. Além disso, no artigo, é definido como vai ser estruturado o mercado de energia, levando em conta o preço de compra, venda, compensação quem carrega a bateria no caso do cenário de bateria compartilhada e outros levados em conta. A partir disso, foram simulados nos cenários citados os custos totais e as economias feitas no caso de

armazenamento centralizado e descentralizado com o uso de tecnologia ponto a ponto e também sem essa tecnologia. O estudo mostra o impacto que o uso de armazenamento de energias e o uso da tecnologia descentralizada como o Blockchain podem ajudar na economia de energia.

Morstyn e Mcculloch (2018) apresentam um estudo de simulação de troca de energia guiada pelo consumidores-produtores de energia (do inglês, *prosumers*) com uso de gerenciamento de múltiplas classes para tecnologias ponto a ponto. A ideia é similar ao texto anterior, já que nessa publicação, é realizado equacionamento para a construção de um mercado de transação de energia com o uso da tecnologia descentralizada ponto a ponto. Foi levado em consideração o uso de armazenamento de energia e a simulação foi considerada uma rede teste com 55 *prosumers* e definindo um perfil e produção de energia de cada um. No final do artigo são levantados os dados em função da simulação modelada, mostrando parâmetros elétricos da rede em função a inserção de energia dos painéis fotovoltaicos na rede principal, o comportamento das baterias de cada perfil de consumidor, importância do uso desse método conjuntamente com a tecnologia descentralizada que gera privacidade aos consumidores em geral e a competição gerada pela estratégia modelada pelo autor para que o preço seja melhor possível para os participantes desse sistema. É um trabalho que faz o modelo de mercado a ser adotado, uso de baterias e energias renováveis através de transações no sistema P2P, abrangendo todas as áreas deste trabalho acadêmico brasileiro.

(NGUYEN et al., 2018) realizam uma simulação a partir de uma modelagem otimizada para painéis solares em telhados com o uso de baterias para armazenamento em um sistema ponto a ponto de troca para realizar as transações de energia. A simulação foi construída sobre uma aplicação do mundo real em uma comunidade local com 500 casas que abrangiam de sistemas de produção solar, baterias, demanda do consumidor e parâmetros mercadológicos como preço de inserir energia na rede, de carregar e descarregar a bateria e outros. A geração realizada mostrou a complexidade de interações entre os participantes do comércio de energia com essa tecnologia descentralizada e como as transações ponto a ponto conseguiram gerar economias para diversos participantes dessa rede, ajudaram na economia de diversos perfis de consumidores e *prosumers*. O artigo além de simular um caso do mundo real que poderia adotar esse tipo de comercialização usando tecnologias P2P, trabalha com o uso de energias renováveis, armazenamento de

baterias e simulação mercadológica, todas as áreas de interesse neste trabalho de conclusão de curso.

(LONG et al., 2018) fizeram um estudo com a mesma ideia com os três últimos, existente uma lógica mercadológica para as transações P2P e do participante para a rede (do inglês, *peer to grid* – P2G), conjuntamente com o uso de baterias usando a energia renovável, no caso painéis fotovoltaicos. Uma característica particular desse artigo em relação aos outros é que na simulação que possui uma estrutura similar de ideia com os demais, foram avaliados diversos aspectos da bateria, como sua capacidade de armazenamento, comparações de desempenho anual e de estações do ano de cada uma, quanto iria ter de consumo próprio, autossuficiência e o custo de energia por casa de todas as baterias com suas diversas capacidades de armazenamento. Chegou à conclusão que o sistema ponto a ponto gerou economia de energia e todo o custo envolvido foi pago ao longo dos anos, mas a ênfase do trabalho em relação aos outros é o estudo feito com as diversas baterias utilizadas, sua performance ao longo do ano e os resultados alcançados envolvendo sua autossuficiência, consumo-próprio e custo de energia por casa, mostrando em um nível mais prático como vai ser o comportamento da carga do consumidor e o quanto ele vai ser o custo da energia do P2G e do P2P.

No próximo artigo, a abordagem terá uma ênfase maior em como será estruturado o mercado com conjunto de sistemas descentralizados *peer to peer*. (PAUDEL et al., 2018) demonstram através de Teoria dos Jogos um sistema de comércio de energia através de painéis fotovoltaicos e armazenamento de energia em uma comunidade de residências locais envolvendo transações P2P. Basicamente, o artigo utiliza um método proposto e irá comparar com alguns outros métodos em um cenário onde todos fariam transações através de um sistema descentralizado e será comparado também com um caso base, em que a transação será feita do ponto a rede e conseqüentemente sem nenhum método de Teoria dos Jogos. Concluiu-se que usando qualquer método abordado no trabalho, e com transações P2P, o custo total da *microgrid* seria muito mais baixo que o P2G e ainda o método abordado abaixaria mais ainda esse custo em comparações com os outros abordados. Esse artigo dá uma ênfase em como modelar o sistema de comércio e poderá ajudar neste trabalho redigido a assimilar uma lógica que beneficie os participantes a comprarem energia mais baratas de seus “vizinhos” de *microgrid* ser um sistema rentável e otimizado para quem vende a energia também.

Esse penúltimo artigo que será citado tem um propósito bem parecido com o anterior, de criar um comércio de energia através de um mercado que irá baratear o custo da energia a longo prazo para o consumidor. (ZEPTER et al., 2019) fala sobre uma modelagem de mercado usando tecnologia descentralizada, em que comparará o método de mercado chamado STEP Market com uma base que seria um P2G e também com outros modelos existentes que será descrito no trabalho. A ideia é bem similar ao do texto anterior, porém poderá servir de base para ver quais as vantagens e desvantagens e aplicabilidade de cada um e usar conforme for convencional.

Por último, o artigo dos (TROUNG et al., 2018) citam um conceito de gestão energética em múltiplas classes que permite que a energia seja tratada de forma diferente com o manuseio do Blockchain para registro de compra e venda de energia e conseqüentemente auxílio na operação de armazenamento de energia. Isso com a mesma ótica dos textos em questão tratados nessa seção de criação de uma lógica mercadológica de compra e venda de energia em uma *microgrid*. A transcrição da modelagem segue basicamente a mesma ideia, considera um cenário de *microgrid* e conjuntamente com uso de energias renováveis, cria-se um sistema que será usado com a tecnologia ponto-a-ponto. Na conclusão artigo, mostra os resultados dos dois modelos adotados, um que o mercado de leilões determina os parâmetros técnicos: algoritmo de controle, capacidade de energia, potência de prioridade e classificação e o da segunda abordagem que é a de tempo real, onde o algoritmo de controle realoca energia e poder de prioridade. Tudo isso citado com o uso de contratos inteligentes para o registro legal de tudo. O artigo em questão poderá servir como base para realizar a simulação como alguns citados também irão servir e como uma opção de análise de como melhorar a construção da lógica mercadológica de cenários utilizados para simular um caso real com a plataforma Blockchain.

### 3.2 REVISÃO DA TECNOLÓGICA

Bitcoin é a plataforma pioneira dos Blockchains, surgiu em 2009 e possui sua criptomoeda como “mascote” desse tipo de tecnologia. Foi o primeiro projeto que possui essa plataforma tecnológica com o intuito de dar segurança, privacidade e transparência entre qualquer transação na rede. É uma plataforma descentralizada, pública e com alto nível de segurança. As plataformas nesta seção foram descritas de acordo com o (PURKAYASTHA, [s.d.]).

A Ethereum é uma plataforma Blockchain já citada neste trabalho e possui um foco grande em *smart-contracts*. Possui características bem parecidas com a plataforma que rege o Bitcoin, além de ser pública, preza bastante pela segurança e descentralização só que possui uma desvantagem que o processo de criação de blocos demora em média dez minutos o que faz que não seja tão otimizado para algumas aplicações no mercado.

A Hyperledger atua e promove usando a tecnologia Blockchain para uso em negócios, contabilidade, interfaces gráficas, aplicativos e contratos inteligentes. É uma empresa com alta popularidade, código aberto e possuem interfaces públicas e privadas de tecnologia descentralizada.

O Multichain é uma plataforma que possui o foco no setor financeiro e usa plataforma Blockchain privada com código aberto. É tratada como uma versão aprimorada do Bitcoin para o mercado financeiro, fornecendo privacidade e transparência entre as transações. A popularidade não é tão grande e a rede é privada.

HydraChain é uma extensão da plataforma Ethereum que cria aplicativos escaláveis baseada em Blockchain que atendem requisitos regulatórios. Possui baixa popularidade e a rede é privada.

A IBM lançou uma plataforma Blockchain que está no catálogo de serviços do Bluemix. Oferece recursos de segurança e infraestrutura de empresas. Possui uma popularidade média e a rede é privada.

IOTA é um novo tipo de tecnologia descentralizada. É baseado em um sistema livro-razão distribuído sem bloco chamado Tangle. Promete ser um sistema que facilita os nano-pagamentos de menor porte sem nenhuma taxa. Possui aplicação pública e baixa popularidade.

A tabela 3 mostra um comparativo entre alguns parâmetros citados das plataformas.

Tabela 3 – Comparativo entre as plataformas

	Bitcoin	Ethereum	Hyperledger	MultiChain	HydraChain	IBM	IOTA
Popularidade	Alta	Alta	Alta	Média	Baixa	Média	Baixa
Tipo de rede	Pública	Pública	Privado/ Público	Privada	Privada	Privado	Pública
Precificação	Bitcoin	Ether	Código aberto	Pago	Ether	Pago	IOTA Token
Linguagens compatíveis	C ++	Python, Go e C++	Python	Python, C# , JavaScript, PHP e Ruby	Python	Javascript	Python, C e Javascript

FONTE: O autor (2019)

## 4 MATERIAL E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentados os conteúdos que foram desenvolvidos pelo Graduando. A itemização típica é apresentada a seguir.

### 4.1 MATERIAL

Nesta seção serão apresentados os materiais que foram utilizados para realizar das simulações apresentadas para concluir este trabalho.

#### 4.1.1 GridLAB-D

Em geradores, o software possui ferramentas de armazenamento de energia, como o foco do trabalho é utilizar baterias para armazenamento de energia e descarga da mesma em outros horários que seriam economicamente interessantes. Além desse modelo genérico de bateria, existe modelo de gerador solar.

O intuito de utilizar o GridLAB-D é a simulação de fluxo de potência para que se possa registrar o fluxo em um determinado intervalo de tempo e depois tabelá-los e registra-los de acordo com uma lógica de mercado para os três casos que serão apresentados. Além disso, o sistema de distribuição não é balanceado, na grande maioria das vezes, nas suas fases limitando a amostragem de outros simuladores disponíveis no meio acadêmico e industrial. Devido a proposição do trabalho em simular os casos propostos em linhas de distribuição, este software portanto, possibilita trabalhar com os cenários propostos com uma certa exatidão.

O resultado é coletado através de um gravador em formato “.xlm” ou “.csv” que pode ser programado para ler parâmetros de tensão e fluxo de potência que serão necessários para toda estrutura feita em relação a análise de queda de tensão e fluxo de potência que vai para cada nó.

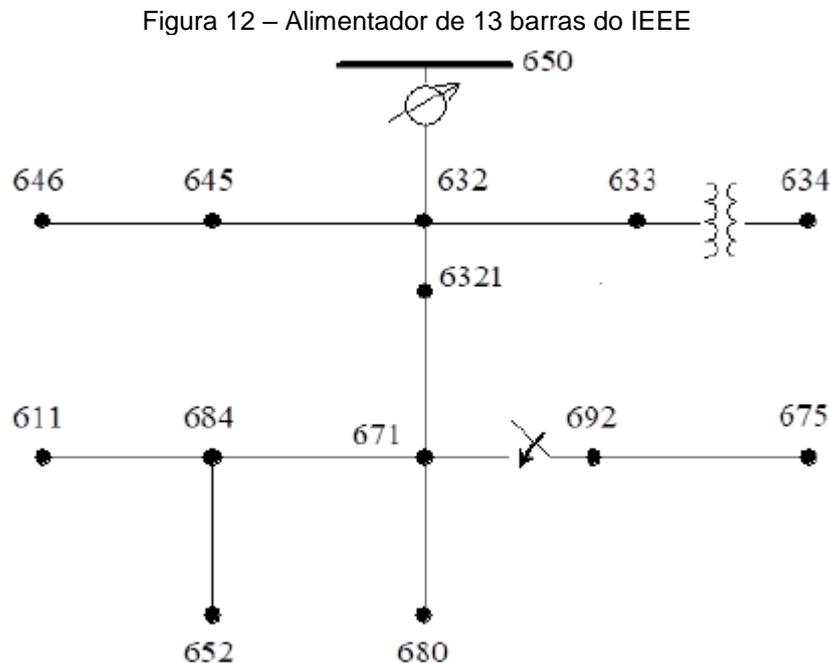
Existem objetos que têm derivações em nós como capacitores, que possuem a função de melhoria automática ou manual na compensação do fluxo de potência. Assim, as cargas possuem dois jeitos de serem modeladas, a primeira é de maneira estática, em que apresenta sua potência ativa e tensão. A segunda é a mudança da carga conforme o clima ou horário. As subestações que atuam como barra de

referência para os cálculos e os medidores são responsáveis pelo monitoramento dos elementos.

Os nós existentes são representação de um conjunto de cargas ou uma carga apenas com uma grande potência. Para a conexão entre esses nós e assim gerar fluxo de potência, existem as linhas que podem ser criadas para adaptar que exista capacitores, reguladores de tensão e transformadores monofásicos ou trifásicos, por exemplo. No arquivo padrão, as linhas todas conectam todos os nós já, mas se for ser inserido algum desses componentes na linha, é necessária uma alteração para adaptar conforme a estrutura desejada.

#### 4.1.2 Alimentador teste

O modelo escolhido teste a ser utilizado é o IEEE disponibilizado abertamente. É um modelo de 13 barras de uma rede de distribuição para modelagem de sistemas elétricos. O diagrama unifilar está ilustrado na figura 12.



FONTE: adaptado do IEEE (2019)

Este modelo possui parâmetros construtivos de grande interesse para realizar as simulações propostas. O sistema possui linhas trifásicas, bifásicas e monofásicas,

reguladores de tensão, banco de capacitores *shunt*, chave seccionadora, baixa tensão de 480V e 4160V média tensão, as linhas variam de subterrâneas e aéreas. O alimentador possui três tipologias de carga, PQ, I e Z, que significa potência ativa e reativa constante, corrente constante e impedância constante. As configurações das distribuições das cargas e dos comprimentos das linhas estão mostradas nas tabelas 4 e 5.

Tabela 4 – Distribuição de cargas das barras

BARRA	Tipologia	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	385	220	385	220	385	220
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	17	10	66	38	117	68
TOTAL:		1175	616	1039	665	1252	821

FONTE: adaptado do IEEE (2019)

Tabela 5 – Comprimento das linhas do sistema

DE	PARA	Fases	Comprimento(ft.)	Config.
632	645	B C N	500	Área
632	633	A B C N	500	Área
645	646	B C N	300	Área
650	632	A B C N	2000	Área
684	652	A N	800	Subterrânea
632	6321	A B C N	500	Área
6321	671	A B C N	1500	Área
671	684	A C N	300	Área
671	680	A B C N	1000	Área
671	692	-	-	Área
684	611	C N	300	Área
692	675	A B C N	500	Subterrânea

FONTE: adaptado do IEEE (2019)

A configuração do regulador entre a barra *Swing* (650) e 632, não será alterada e os parâmetros serão ilustrados na tabela 6.

Tabela 6 – Parâmetros do regulador

Regulador de tensão			
Localização	650 - 632		
Fases de conexão	A - B - C		
Tipo de conexão	Y - Y		
Largura de banda (V)	2		
Relação primária do transformador de corrente	700		
Relação do transformador potencial	20		
Config. de compensação de queda de tensão	Fase A	Fase B	Fase C
Nível de tensão (V)	122	122	122
Compensação resistiva R (V)	3	3	3
Compensação resistiva X (V)	9	9	9

FONTE: adaptado do IEEE (2019)

Existem dois bancos de capacitores *shunt* indicados nas barras 100 kVAr na fase C da barra e um banco de capacitor para cada fase da barra 611 de 200 kVAr em cada uma.

#### 4.1.3 Análise elétrica do sistema

O do alimentador deste sistema possui natureza elétrica estática, ou seja, possuem uma simulação em um determinado intervalo de tempo. Para conseguir analisar como o sistema vai se comportar com a inserção de baterias elétricas, será necessário fazer diversas análises em regime permanente em intervalos de tempo. Isso será feita através de curvas de carga, ocorrendo uma variação da demanda ao longo de um dia de simulação com as barras e as baterias seguirão o mesmo comportamento, carregando, descarregando ou sem alteração na carga ao longo do dia no mesmo intervalo de tempo.

Com essa configuração descrita no sistema acima, é possível verificar como o sistema terá comportamento ao longo do dia e como as baterias podem contribuir para realizar o fluxo de potência e atender demanda em algumas das barras do sistema.

Após a inserção das curvas de cargas nas barras 675, 634 e 645 que são barras que possuíam potência ativa e reativa constante. A tipologia da carga foi inserida como um padrão de uma residência de média tensão em um dia útil retirado de (YAMAKAWA, 2007). Utilizaram-se os valores em pu com valor base apresentado de cada fase para energia ativa e reativa para posteriormente multiplicar este valor

com as potências ativas e reativas de cada fase em cada um dos nós apresentadas na tabela 6. Assim, foi modelado um sistema com curvas de carga para essas barras para poder realizar uma análise em um sistema quase dinâmico.

Definindo este como o caso base a ser comparado com as outras simulações que irão envolver uso de bateria e uso de bateria com o Blockchain.

## 4.2 MÉTODOS

### 4.2.1 Definição dos casos

O primeiro caso se refere ao sistema sem bateria, só com apenas com curvas de carga nos nós de referência.

O segundo caso será simulado com as baterias situadas em todos os respectivos nós, só que sem análise do fator de potência e queda de tensão.

O terceiro caso é o segundo caso com análise de queda de tensão e fator de potência no Blockchain conforme um critério adotado na seção 4.2.5.

Os três casos terão precificação de acordo com a configuração do sistema e dos componentes elétricos existentes em cada um.

### 4.2.2 Definições dos procedimentos e localizações das baterias

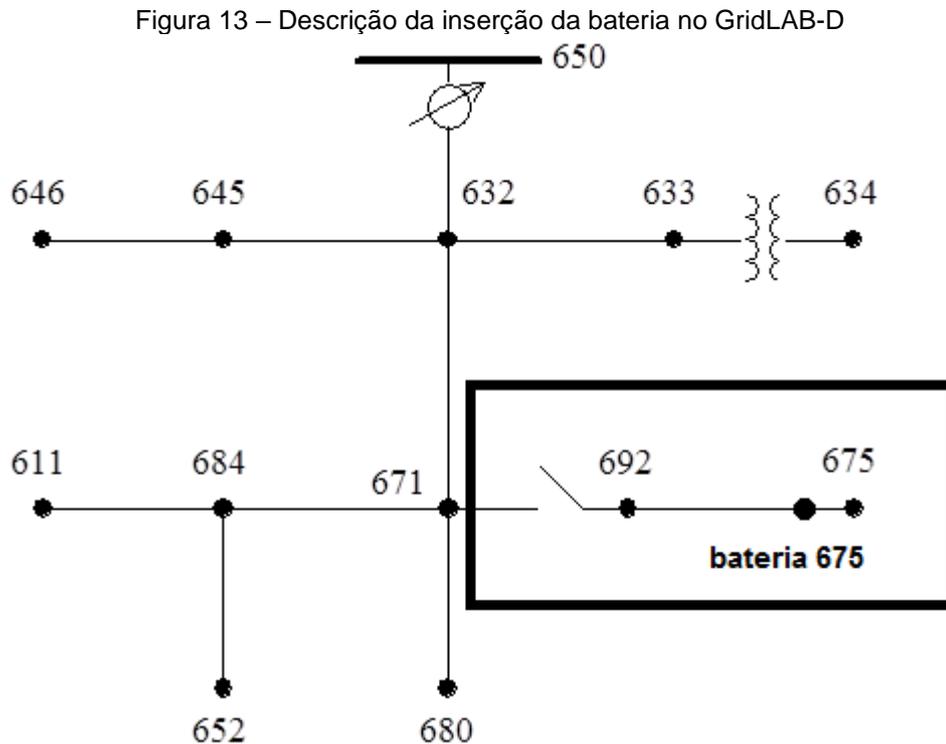
A realização dos procedimentos seguiu algumas premissas que foram modificadas ou adaptadas ao longo do processo de simulação devido às limitações de software e execução.

A primeira definição foi o tempo de amostragem dos fluxos de potências, como já citado anteriormente, os nós vão ter uma curva de demanda ao longo do tempo e o comportamento dela foi baseado no (YAMAKAWA, 2007), só que o tempo de amostragem será definido de meia em meia hora com a simulação ocorrendo dentro de um dia. O tempo escolhido foi baseado para ter uma boa amostragem dentro de um dia e conseguir detalhar a curva de carga do que uma amostra de uma hora.

Após a definição do intervalo de tempo e adaptando a curva de carga com as potências das barras mostrado na tabela 4, foi inserida primeiramente uma bateria em uma das barras, no caso, foi escolhida a barra 675.

A bateria inserida para este nó, em um primeiro instante, foi dimensionada para ter um padrão de médio porte. Os valores de potência nominal de pequeno, médio e grande serão padrões e os valores definidos ao longo da descrição desta seção. A potência nominal dessa bateria escolhida foi de 100 kW com uma capacidade armazenamento de 1000 kWh. Foi escolhida uma capacidade de armazenamento dez vezes maior com o intuito das mesmas conseguirem descarregar em horário de pico e meia antes, durante esse horário e até as 22h30 e carregarem em um intervalo de 8 horas ao longo da madrugada e início da manhã. É importante ressaltar que o horário de pico é o mesmo definido pela Copel, das 18h até às 21h.

Para inserir a bateria no GridLAB-D, é necessário criar um objeto de medição, este objeto é inserido nas linhas dos nós e assim foi posicionado na linha 692-675 mais próximo ao nó 675, para que este nó fosse alimentado pela bateria e não tivesse muitas perdas dos condutores. A inserção desta bateria está exemplificada na figura 13.



FONTE: Adaptado do IEEE (2019)

Após a inserção da bateria, foi realizado um *schedule das baterias* para compatibilizar o horário das curvas de carga dimensionada. O carregamento foi feito

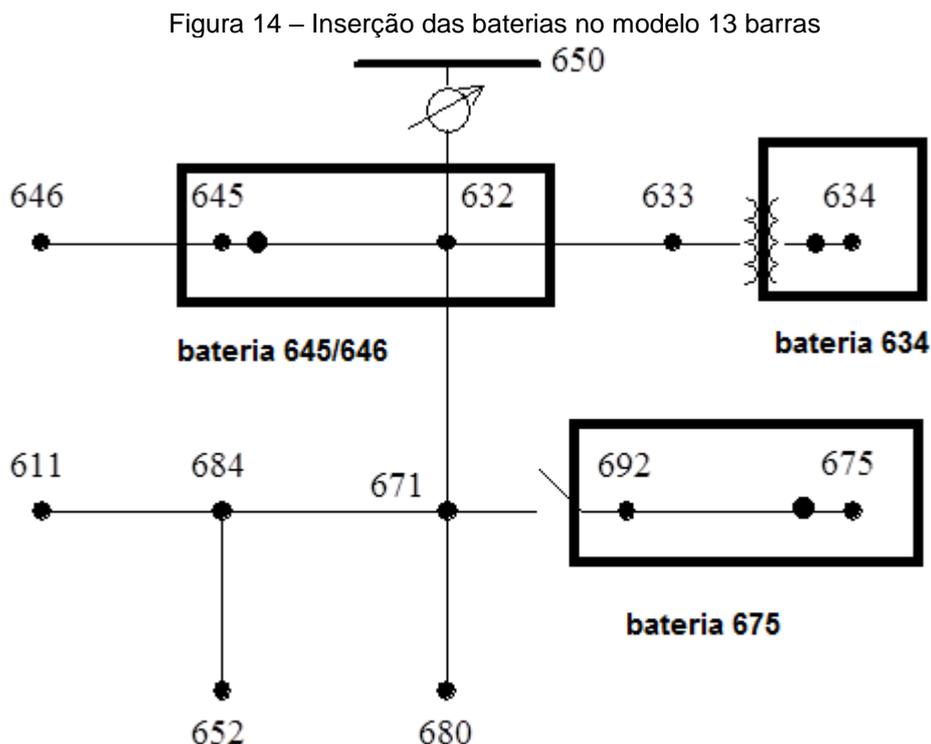
na madrugada, isso será justificado mais a frente quando for descrito a lógica de mercado, e o descarregamento para a rede como foi descrito anteriormente.

Com os cronogramas alinhados, foi feito a simulação do caso base, caso com as curvas de cargas nas barras já descritas anteriormente e a simulação com a bateria inserida próxima a barra conforme a figura 13.

Ao simular, é necessário pedir a ferramenta de análise de redes de distribuição que gere um arquivo, escolhido de separador por vírgula (csv) e assim escolher as potências reativas e ativas para cada fase, conjuntamente com a tensão que vai diretamente para o nó. Todos esses parâmetros serão mostrados para o caso base e com a de bateria 675. Ao abrir o arquivo podia notar a inserção de uma potência dimensionada de 1/3 do total dela em cada fase após a bateria e um aumento de carga até bateria no período de madrugada e começo de manhã, no intervalo tempo que a bateria carrega.

Posteriormente, foram inseridas mais duas baterias, uma de cada vez, uma perto da barra 634, entre o secundário do Trafo e esta barra e a outra próxima a barra 645, entre a barra 632 e a barra 646. As dimensões de um serão apresentado e justificado na 4.2.4, nesta seção será abordado apenas a localização das mesmas.

A figura 14 mostra como ficou a configuração final.



### 4.2.3 Lógica de mercado

A lógica de mercado foi adaptada conforme o software e o intervalo de tempo das curvas de carga.

Vale lembrar que a unidade monetária é de uma criptomoeda inventada, não foi pensado câmbio com qualquer moeda física e os valores que serão apresentados serão apenas para efeito comparativo e de saldo.

Para o cenário 1, o preço da rede é varável de acordo com o horário.

Para os cenários 2 e 3, inicialmente seria feito um leilão de energia horário em que as baterias ofereceriam preços de energia para por unidade de potência para um determinado intervalo de tempo e a rede possuiria preços variáveis sempre maiores que a bateria, porém quando foi testado inserir um intervalo de tempo de meia em meia hora e depois sobrescrever os intervalos para meia hora posterior e assim por diante, o GridLAB-D não processa o cronograma de bateria e assim nunca processa o carregamento e descarregamento da bateria já que o cronograma é diário e precisa ser lido durante toda simulação, ao abrir e fechar o programa com os intervalos de meia hora, basicamente a simulação vê o caso de uma bateria como se fosse o caso base e retorna valores iguais a este.

Após essa constatação, percebeu-se que isso seria um problema para uma lógica previamente pensada para o Blockchain aceitar e rejeitar um bloco em um determinado horário porque o bloco rejeitaria caso tivesse queda de tensão maior que 0,95 pu ou 1,05 pu e um fator de potência na barra *SWING* e nas linhas que vão até a barra desejada, já que o arquivo vai simular um dia inteiro e não pode voltar em um determinado horário que ocorreu subtensão, sobretensão ou diminuição do fator de potência para abaixo de 0,92. O Blockchain no caso pode não aceitar o Bloco após a simulação com o tratamento de dados e assim não registra-lo na rede, porém a potência será transmitida na simulação, devido a ela ter sido executada previamente.

A lógica de mercado adotada para os casos 2 e 3 foram baseadas nos horários da simulação, a precificação é feita separadamente para a bateria e para a rede.

Para a rede, foi definido um multiplicador do preço conforme o horário e esse multiplicador aumenta próximo a horários de pico e mais ainda no horário de pico. O preço é composto por um valor por unidade de potência, potência aparente conforme a leitura da simulação e o intervalo de horas, no caso, é 0,5 devido a simulação ser

feita a cada meia hora e o multiplicador horário, tudo isso multiplicado para dar o preço final.

Para a bateria, a precificação é feita basicamente feita nos horários de descarregamento dela, já que foi definido exatamente os horários isso ocorrerá. O preço é composto exatamente pelos mesmos parâmetros que o da rede, porém o multiplicador será menor em relação ao da rede para ser um atrativo para o nó pagar uma parcela mais barata da energia do que possuir energia apenas da rede.

As tabelas 7 e 8 ilustram os preços das baterias e da rede conforme o dia.

Tabela 7 – Precificação parte 1

		Precificação	
		Bateria	Rede
Horário	00:00 até 00:30	-	Price = 1,6 x PU x PA x HORA
	00:30 até 01:00	-	Price = 1,6 x PU x PA x HORA
	01:00 até 01:30	-	Price = 1,6 x PU x PA x HORA
	01:30 até 02:00	-	Price = 1,6 x PU x PA x HORA
	02:00 até 02:30	-	Price = 1,5 x PU x PA x HORA
	02:30 até 03:00	-	Price = 1,5 x PU x PA x HORA
	03:00 até 03:30	-	Price = 1,5 x PU x PA x HORA
	03:30 até 04:00	-	Price = 1,5 x PU x PA x HORA
	04:00 até 04:30	-	Price = 1,5 x PU x PA x HORA
	04:30 até 05:00	-	Price = 1,5 x PU x PA x HORA
	05:00 até 05:30	-	Price = 2,0 x PU x PA x HORA
	05:30 até 06:00	-	Price = 2,0 x PU x PA x HORA
	06:00 até 06:30	-	Price = 2,0 x PU x PA x HORA
	06:30 até 07:00	-	Price = 2,0 x PU x PA x HORA
	07:00 até 07:30	-	Price = 2,0 x PU x PA x HORA
	07:30 até 08:00	-	Price = 2,0 x PU x PA x HORA
	08:00 até 08:30	-	Price = 2,0 x PU x PA x HORA
	08:30 até 09:00	-	Price = 2,0 x PU x PA x HORA
	09:00 até 09:30	-	Price = 2,0 x PU x PA x HORA
	09:30 até 10:00	-	Price = 2,0 x PU x PA x HORA
10:00 até 10:30	-	Price = 2,0 x PU x PA x HORA	
10:30 até 11:00	-	Price = 2,0 x PU x PA x HORA	
11:00 até 11:30	-	Price = 2,0 x PU x PA x HORA	
11:30 até 12:00	-	Price = 2,0 x PU x PA x HORA	

FONTE: autor (2019)

Tabela 8 – Precificação parte 2

		Precificação	
		Bateria	Rede
Horário	12:00 até 12:30	-	Price = 2,5 x PU x PA x HORA
	12:30 até 13:00	-	Price = 2,5 x PU x PA x HORA
	13:00 até 13:30	-	Price = 2,5 x PU x PA x HORA
	13:30 até 14:00	-	Price = 2,5 x PU x PA x HORA
	14:00 até 14:30	-	Price = 2,5 x PU x PA x HORA
	14:30 até 15:00	-	Price = 2,5 x PU x PA x HORA
	15:00 até 15:30	-	Price = 2,5 x PU x PA x HORA
	15:30 até 16:00	-	Price = 2,5 x PU x PA x HORA
	16:00 até 16:30	-	Price = 2,5 x PU x PA x HORA
	16:30 até 17:00	-	Price = 2,5 x PU x PA x HORA
	17:00 até 17:30		Price = 3,0 x PU x PA x HORA
	17:30 até 18:00	Price = 2,75 x PU x PA x HORA	Price = 3,0 x PU x PA x HORA
	18:00 até 18:30	Price = 2,75 x PU x PA x HORA	Price = 3,5 x PU x PA x HORA
	18:30 até 19:00	Price = 2,75 x PU x PA x HORA	Price = 3,5 x PU x PA x HORA
	19:00 até 19:30	Price = 2,75 x PU x PA x HORA	Price = 3,5 x PU x PA x HORA
	19:30 até 20:00	Price = 2,75 x PU x PA x HORA	Price = 3,5 x PU x PA x HORA
	20:00 até 20:30	Price = 2,75 x PU x PA x HORA	Price = 3,5 x PU x PA x HORA
	20:30 até 21:00	Price = 2,75 x PU x PA x HORA	Price = 3,5 x PU x PA x HORA
	21:00 até 21:30	Price = 2,75 x PU x PA x HORA	Price = 3,0 x PU x PA x HORA
	21:30 até 22:00	Price = 2,5 x PU x PA x HORA	Price = 3,0 x PU x PA x HORA
22:00 até 22:30	Price = 2,5 x PU x PA x HORA	Price = 1,6 x PU x PA x HORA	
22:30 até 23:00	-	Price = 1,6 x PU x PA x HORA	
23:00 até 23:30	-	Price = 1,6 x PU x PA x HORA	
23:30 até 00:00	-	Price = 1,6 x PU x PA x HORA	

FONTE:O Autor (2019)

No princípio foi pensado que as transações poderiam ocorrer da bateria para rede, da bateria para o nó, do nó para a rede e da rede para bateria. Porém, para analisar a precificação da rede para a bateria, teria que ser dimensionado uma bateria com capacidade de armazenamento muito grande impossibilitando qualquer outro tamanho de bateria para conseguir ter um fluxo reserva e alimentar outros nós e fazer uma análise bem complexa dos fluxos em praticamente em todos os nós. Portanto, foi definido que a bateria vai gerar energia apenas para a barra e vai receber energia para de rede para carregamento dela, a rede só vai disponibilizar energia para a bateria e nó e da barra vai receber energia da rede e da bateria.

#### 4.2.4 Definições para criação do bloco

Além de utilizar os conceitos de Blockchain adotados no capítulo de fundamentação teórica em relação às tecnicidades da construção e estrutura do bloco, esta seção irá tratar em relação ao bloco no determinado horário ser aceito devido a parâmetros elétricos como fator de potência da linha próximo ao nó referência, já que serão analisadas para todos os nós próximos as baterias e da barra *swing* Iria ser incluída análise de frequência, analisando se esta se encontra na faixa entre 59,5 Hz e 60,5 Hz, porém o software não possui um *output* que dê este valor diretamente, assim teria que calculá-lo por fora através de funções de onda, o que iria fugir um pouco do propósito do trabalho. Os já definidos no começo do parágrafo já terão grande importância para qualidade da transmissão da energia.

A queda de tensão será analisada conforme a o limite de operação na faixa de 0,95 e 1,05 pu em relação à tensão nas linhas próximas as baterias e a barra *swing* do caso base. Caso estivesse acima ou abaixo desses limites, o bloco é rejeitado.

O fator de potência foi pensado em fazer duas condições para o bloco ser aceito. A primeira é definir que o fator de potência seja de pelo menos 0,92 do limite mínimo definido pela ANEEL. A segunda seria que se o fator de potência com a inserção da bateria for maior que o caso base, assim a bateria está melhorando o fator de potência e não deve ser descartado mesmo que o fator de potência for menor que 0,92 já que por se tratar de sistema de distribuição, as fases não são equilibradas. E a terceira é um comparativo com o fator de potência do caso base, se a diferença for de 5%, o bloco aceitará, já que não houve grande influência da bateria no fator de potência e o bloco assim proceder com o registro das transações.

A tabela 9 mostra as condições descritas.

Tabela 9 – Critérios para criação do bloco

	Queda de tensão (QT)	Fator de potência (FP)
Critério 1	entre (0,95 e 1,05) pu	mínimo 0,95 pu
Critério 2	-	FP maior que caso base
Critério 3	-	FP de até 5% menor que caso base

FONTE: O autor (2019)

#### 4.2.5 Dimensões da bateria

Depois de construir a lógica de mercado e as condições para aceitar a a criação do bloco, dimensionou -se as outras baterias que entrariam perto a barra 645 e 634.

Ao dimensionar elas foi notado que uma bateria de pequeno porte, no caso uma de 3 kW não faria muito efeito e só iria custar muito para sua operação especificamente no sistema de forma isolada, então considerou-se o no nó 634 como se fosse uma um somatório de baterias de 3kW com cargas de 20kW para cada residência e chegou no total de um conjunto de bateria representada por uma no GridLAB-D de 72 kW. Porém, quando foi dimensionada uma grande ou médio para 675, ocorria fluxo reverso na fase B por ser muito menor que as outras. O valor escolhido por fim foi de 120 kW que é o limite máximo para não ter fluxo reverso em nenhum momento.

A bateria referente a 675 mudou-se a potência nominal dela para uma de médio um bem abaixo do desejado, sendo considerado de 72 kW, o valor que a barra 634 era dimensionada. A bateria de representaria a somatória de várias de pequenas baterias residenciais passou a ser exercida pela 675.

Por fim, a bateria colocada perto do nó 645, foi de médio porte de 100 kW, como era anteriormente da próxima do nó 675. Porém, esta bateria precisou ter uma configuração bifásica devido ao nó 646 ser monofásica na fase, alimentando a barra 645 na fase B e a 646 na fase C e se a configuração do ponto de medição oriundo da bateria não fosse bifásica, ocorreria *mismatch* na configuração da linha.

Vale ressaltar que nenhuma barra poderia receber uma carga de bateria maior de 120 kW, pois sempre que foi dimensionada acima desse valor ocorreu fluxo reverso.

A tabela 10 mostra os parâmetros nominais citados de cada bateria, como dito anteriormente a capacidade de armazenamento será de dez vezes maior que a potência nominal para ser descarregado das 17h30 às 22h30 e carregado da 0h00 até as 8h.

Tabela 10 – Parâmetros adotados na bateria.

	Bateria 634	Bateria 645/646	Bateria 675
Potência nominal (kW)	120	100	72
Capacidade de armazenamento (kWh)	1200	1000	720
Estado de carga	0,2	0,2	0,2

FONTE: O autor (2019)

O inversor que será associado a cada bateria foi dimensionado com tipologia padrão de eficiência de 0,95 e com potência nominal acima da bateria para que o inversor não seja o fator limitante e sim a carga e descarga que ocorrerá ao longo do dia.

## 5 ANÁLISE DOS RESULTADOS E DISCUSSÃO

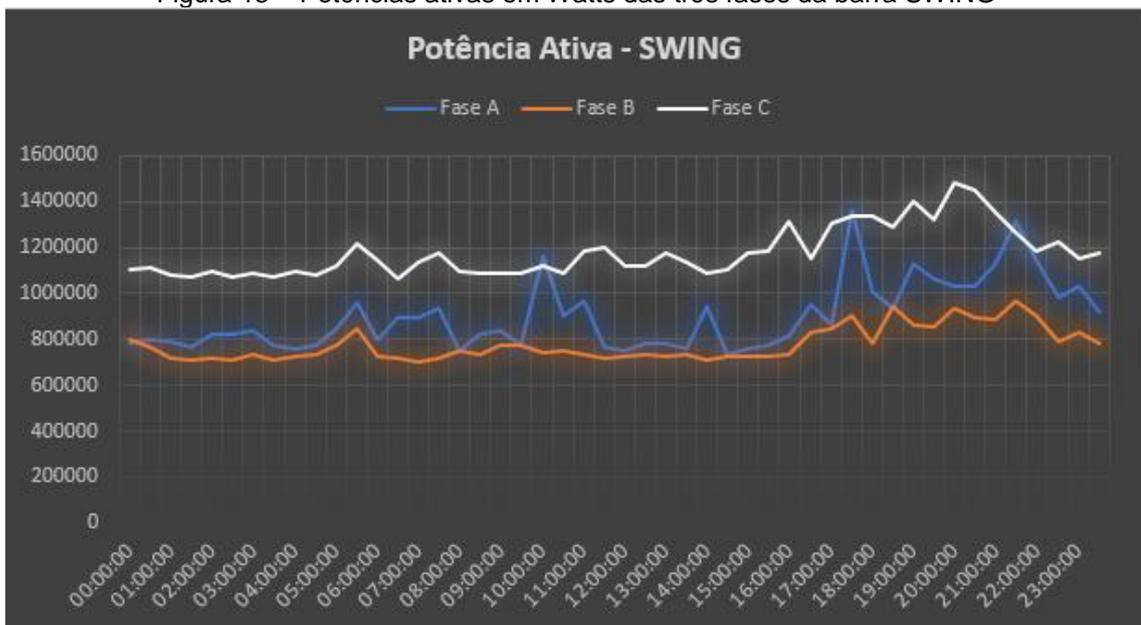
Neste capítulo, será tratado os resultados obtidos através da modelagem do sistema que foi simulado pelo GridLAB-D em comparação aos casos.

### 5.1 CASO 1 - BASE

Nesta seção serão apresentados parâmetros elétricos na saída do alimentador do sistema de 13 barras do IEEE, tanto para a tensão quando para a potência ativa, reativa e do fator de potência no sistema. Estes dados serão de grande importância para comparativo com os outros dois casos para mostrar como foi feita toda a lógica de programação.

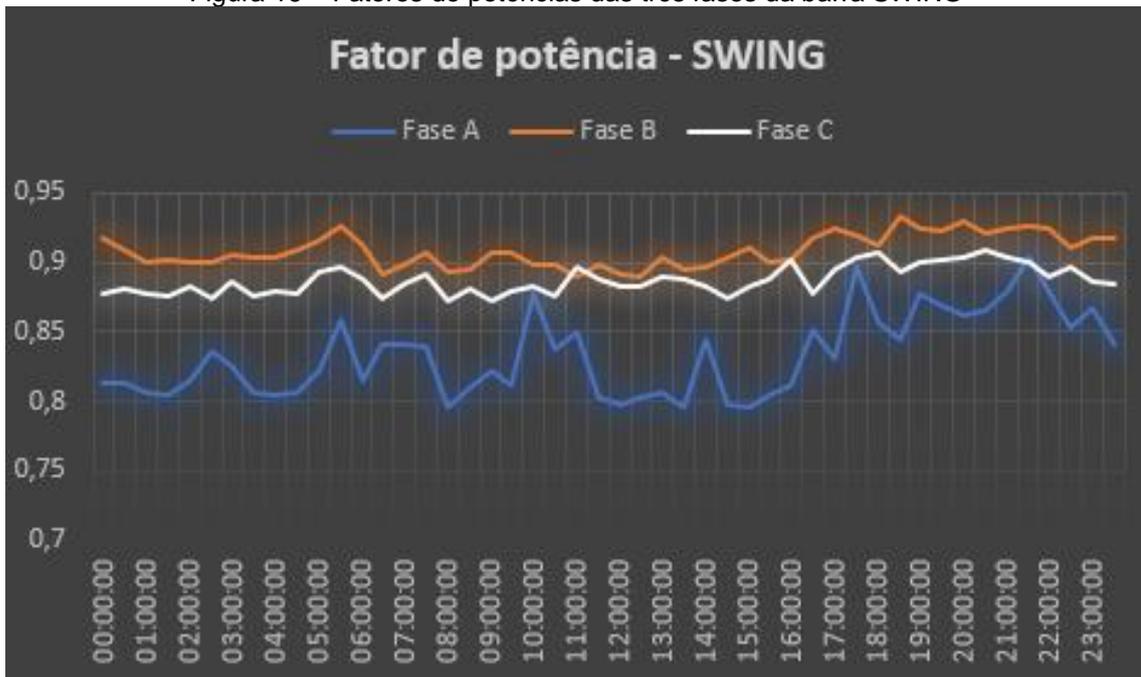
A figura 15 mostra as potências ativa e a figura 16 o FP da barra SWING.

Figura 15 – Potências ativas em Watts das três fases da barra SWING



FONTE: O autor (2019999999)

Figura 16 – Fatores de potências das três fases da barra SWING

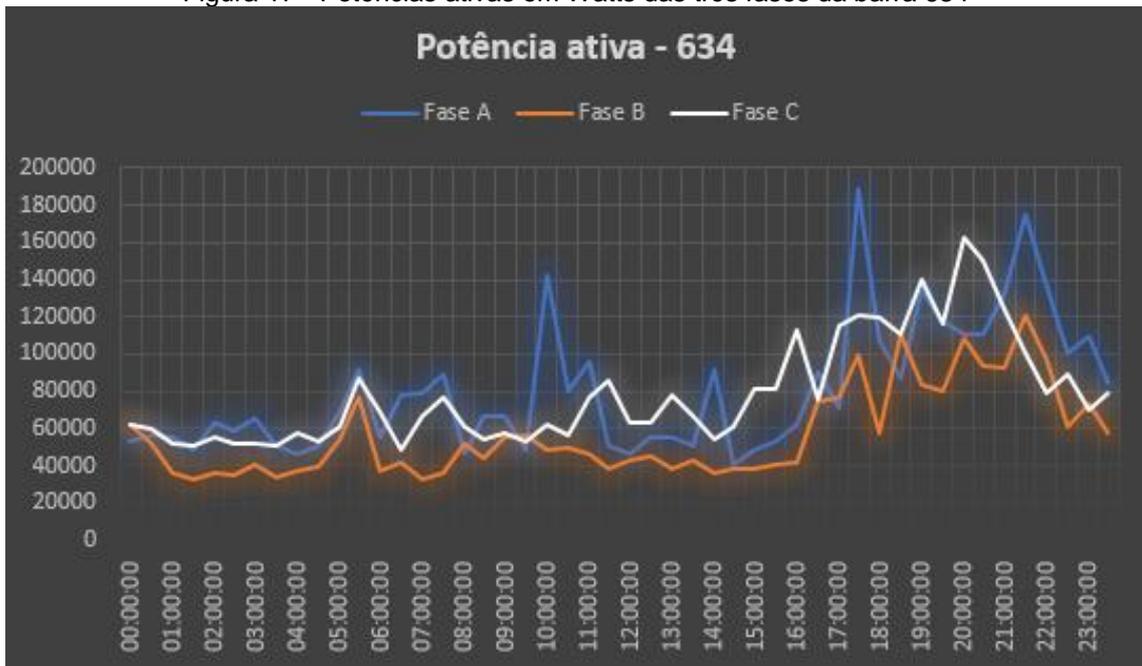


FONTE: O autor (2019)

Pode-se perceber que os fatores de potência ficam em grande parte do tempo abaixo de 0,92, principalmente a fase A, isso será tratado melhor quando for abordado a comparação com os casos 2 e 3. Em relação as potências ativas, a fase C possui uma carga maior que as outras fases.

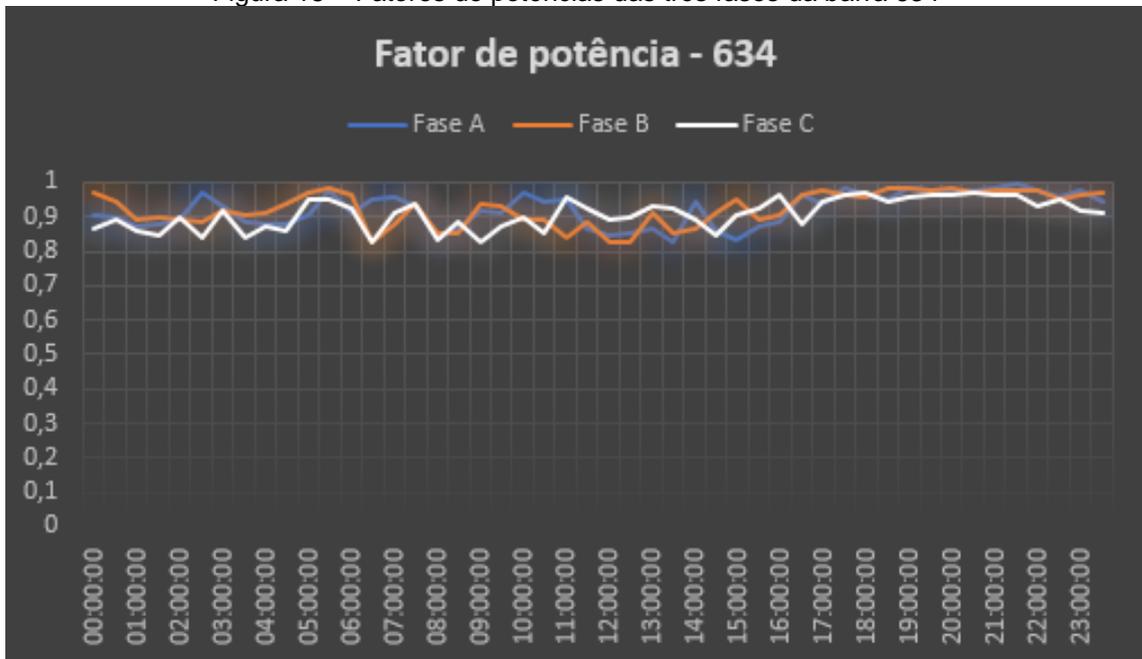
A seguir, serão apresentadas as potências ativas, fatores de potência e tensão em todas as fases de cada barra que a bateria irá alimentar nos casos 2 e 3. As figuras 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24 e 25 representam respectivamente para cada um dos parâmetros acima citados das barras 634, 645, 646 e 675. Em que os eixos horizontais representam as horas do dia e o eixo vertical representam o fator de potência que é adimensional, a tensão dada em Volts ou a potência ativa com unidade em Watts, dependendo da figura.

Figura 17 - Potências ativas em Watts das três fases da barra 634



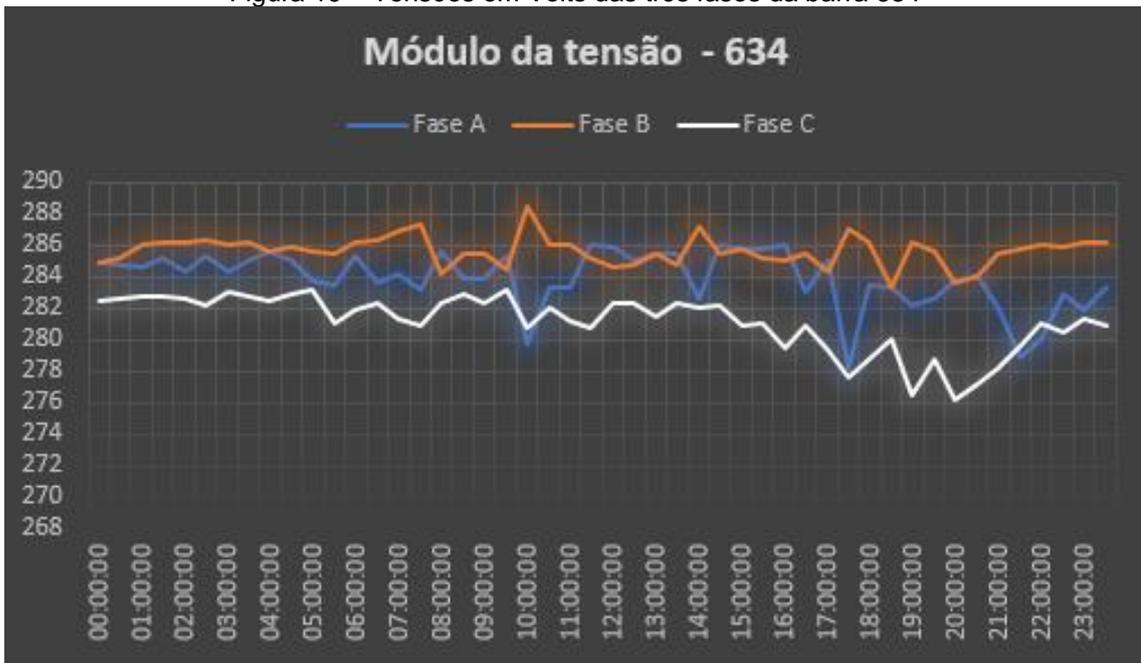
FONTE: O autor (2019)

Figura 18 – Fatores de potências das três fases da barra 634



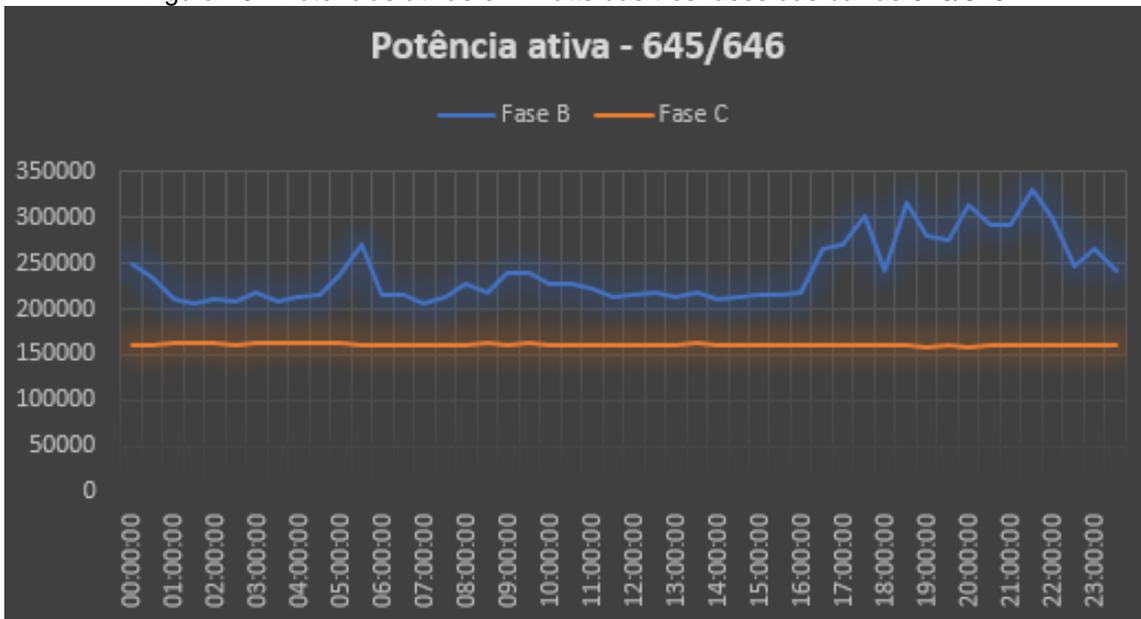
FONTE: O autor (2019)

Figura 19 – Tensões em Volts das três fases da barra 634



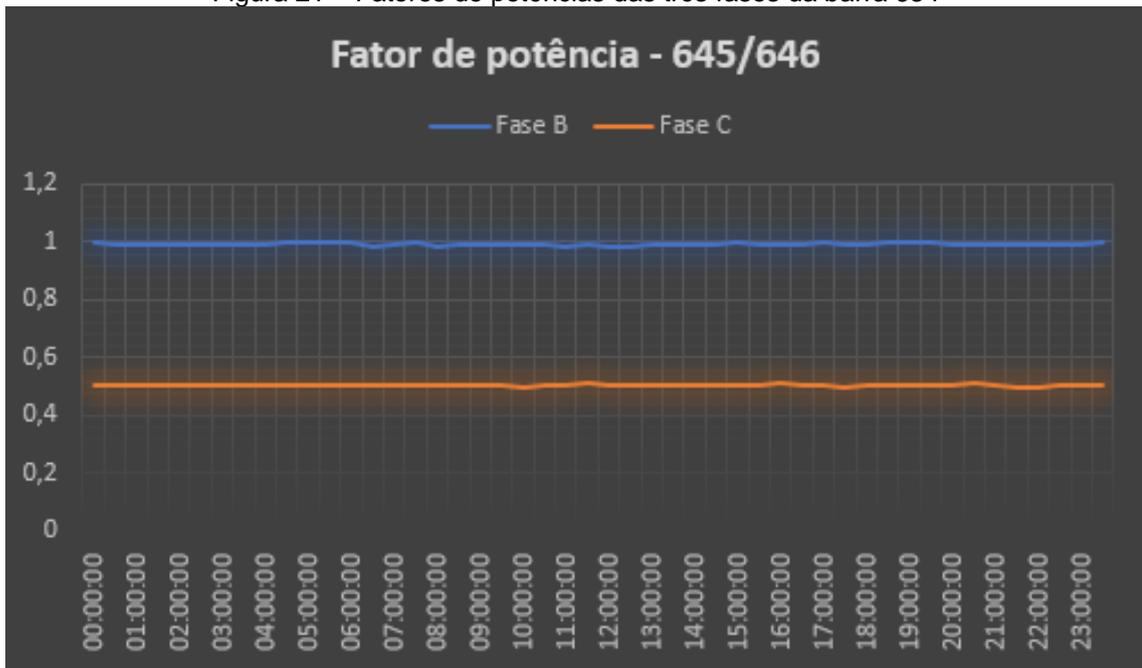
FONTE: O autor (2019)

Figura 20 - Potências ativas em Watts das três fases das barras 645/646



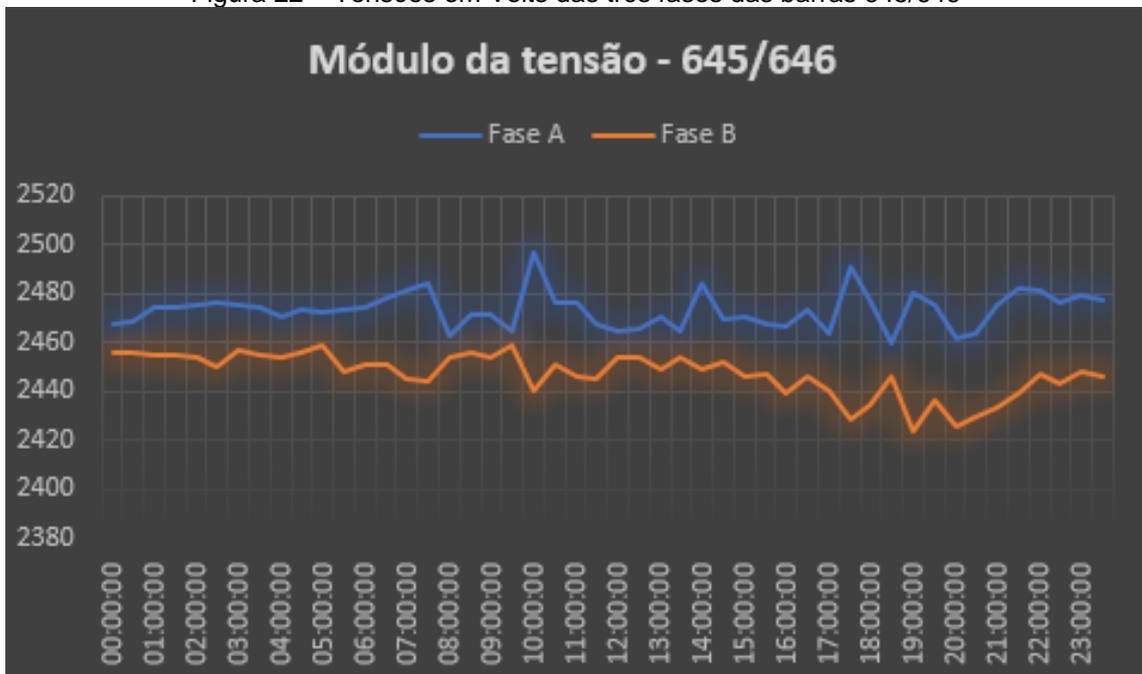
FONTE: O autor (2019)

Figura 21 – Fatores de potências das três fases da barra 634



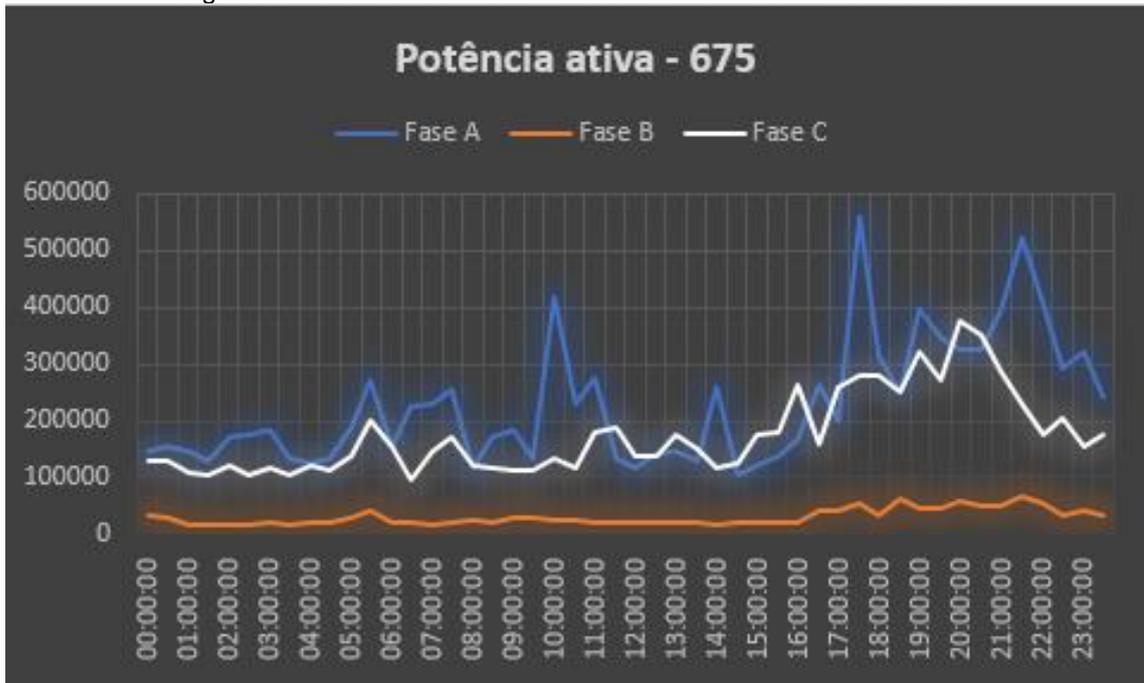
FONTE: O autor (2019)

Figura 22 – Tensões em Volts das três fases das barras 645/646



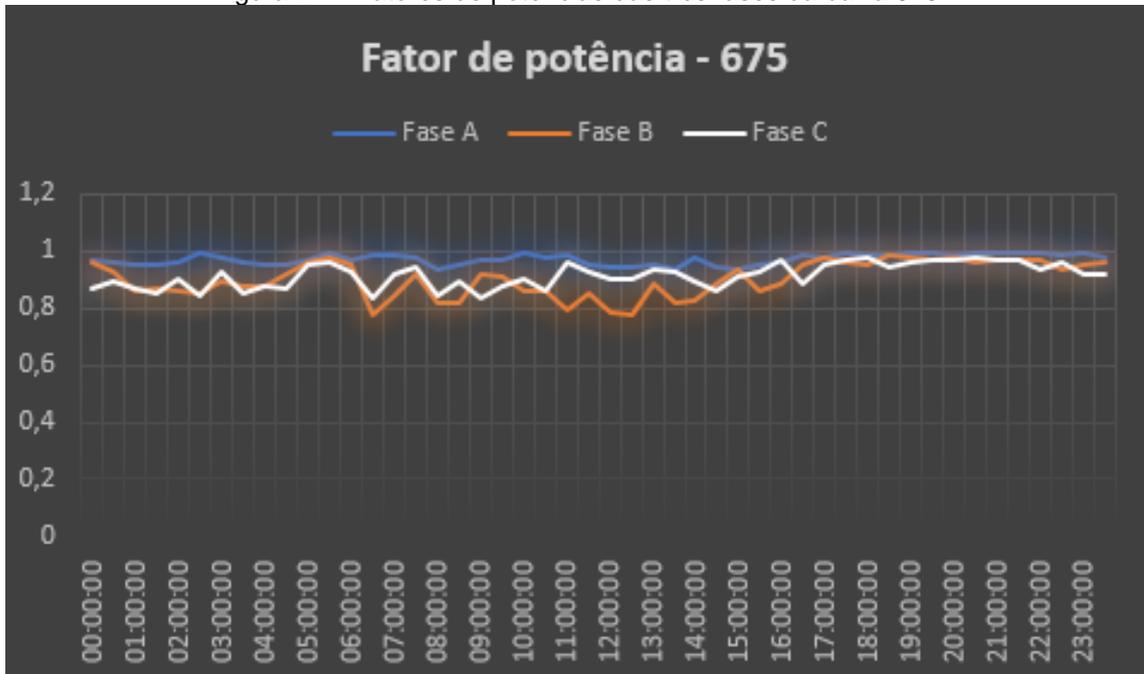
FONTE: O autor (2019)

Figura 23 – Potências ativas em Watts das três fases da barra 675



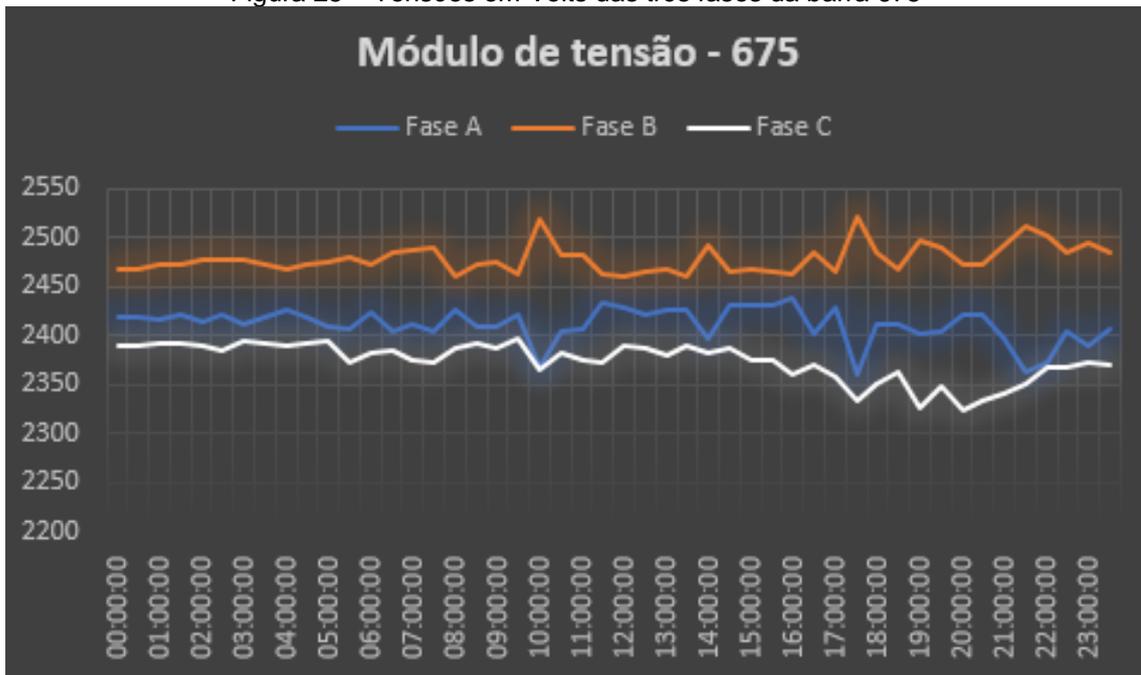
FONTE: O autor (2019)

Figura 24 – Fatores de potências das três fases da barra 675



FONTE: O autor (2019)

Figura 25 – Tensões em Volts das três fases da barra 675



FONTE: O autor (2019)

Estes gráficos representam os comportamentos dos três parâmetros elétricos que servirão como base para posterior análise para os casos 2 e 3.

Vale ressaltar que a carga do nó 656 é constante e por isso tem os comportamentos lineares para o a potência ativa e fator de potência ilustrados nas figuras 20 e 21.

Em relação ao fator de potência, pode-se notar como foi ressaltado que eles são desequilibrados e alguns fatores na maioria do tempo deram menores que 0,92 que seria o limite estipulado pela ANEEL. Isso justifica a lógica feita para a análise de fator de potência feita no capítulo anterior, já que com a inserção das baterias, no horário de carregamento e descarregamento que ela alterará o fator de potência, se essa alteração vai melhorar esse fator no alimentador e na barra anterior a bateria, o bloco aceitará a transação e se o fator de potência analisado for até 5% menor, o bloco aceita também por se tratar de um erro ínfimo.

Outro ponto a se ressaltar é que os aparelhos eletrônicos consomem energia reativa da rede quando estão conectados na tomada e não sendo utilizados constantemente, isso piora o fator ao longo do dia, porém no final do dia, quando as pessoas geralmente voltam para casa, os equipamentos são ligados, tornando a potência ativa maior proporcionalmente que a reativa e assim melhorando este fator, isso pode ser observado em praticamente todas as figuras apresentadas acima. Já

que as curvas de cargas foram baseadas em residências de consumidor de médias renda.

A tensão apresenta majoritariamente variações de tensão, relação ao seu valor mínimo e máximo, em torno de 50V, o que representa em torno de 2%, ou seja, a carga consumida ainda mais em horários de pico que apresentam maiores quedas devido ao uso dos equipamentos elétricos e eletrônicos que são ligados quando as pessoas chegam em casa, não apresentam tanta queda em relação ao valor máximo apresentado durante o dia.

A potência ativa varia de acordo com a curva de carga apresenta e será melhor discutida com a comparação aos cenários com bateria.

Como o sistema do caso base possui apenas curvas de cargas para as barras e apenas a rede vendendo energia, seu preço será maior que o do caso 2 por exemplo, que possui bateria e não existe restrição de bloqueio de energia como o caso 3.

A figura 26 apresenta o preço a ser pago para a rede pela barra, que é o mesmo preço que a rede irá ganhar no final do dia.

Figura 26 – Preço pago por cada nó e o recebido pela rede de cada nó

Node 675
Pagamento total no dia pelo nó 675 foi de 130909.6521074081
Capital acumulado pela rede no dia para o nó 675 foi de 130909.6521074081
Node 634
Pagamento total no dia pelo nó 634 foi de 62247.34970381979
Capital acumulado pela rede no dia para o nó 634 foi de 62247.34970381979
Node 645
Pagamento total no dia pelo nó 645 foi de 66716.89495816882
Capital acumulado pela rede no dia para o nó 645 foi de 66716.89495816882
Node 646
Pagamento total no dia pelo nó 645 foi de 43924.625458121474
Capital acumulado pela rede no dia para o nó 646 foi de 43924.625458121474

FONTE: O autor (2019)

## 5.2 CENÁRIO BASE COM BATERIAS

A seguir serão apresentados os mesmos gráficos para as mesmas fases e barras comparando com o caso base. A diferença desta vez é que serão apresentados

os parâmetros elétricos até o ponto da bateria, não incluindo o que a bateria gera, pois na simulação do GridLAB-D, a rede fornece energia necessária para atender a carga conforme a ajuda da bateria, se a bateria precisar ser descarregada, a energia fornecida até o ponto da bateria será maior e depois dela será muito parecido ao caso base. Se a bateria carregar a carga em um instante, a rede fornecerá menos energia até o ponto de descarregamento, depois disso a bateria irá complementar a energia necessária para alimentar a carga.

Para a barra *SWING* continua sendo a mesma comparação, da potência que sai desse alimentador e vai diretamente para todo modelo de 13 barras.

Em relação a tensão, foi analisada a tensão nos nós que as baterias alimentam.

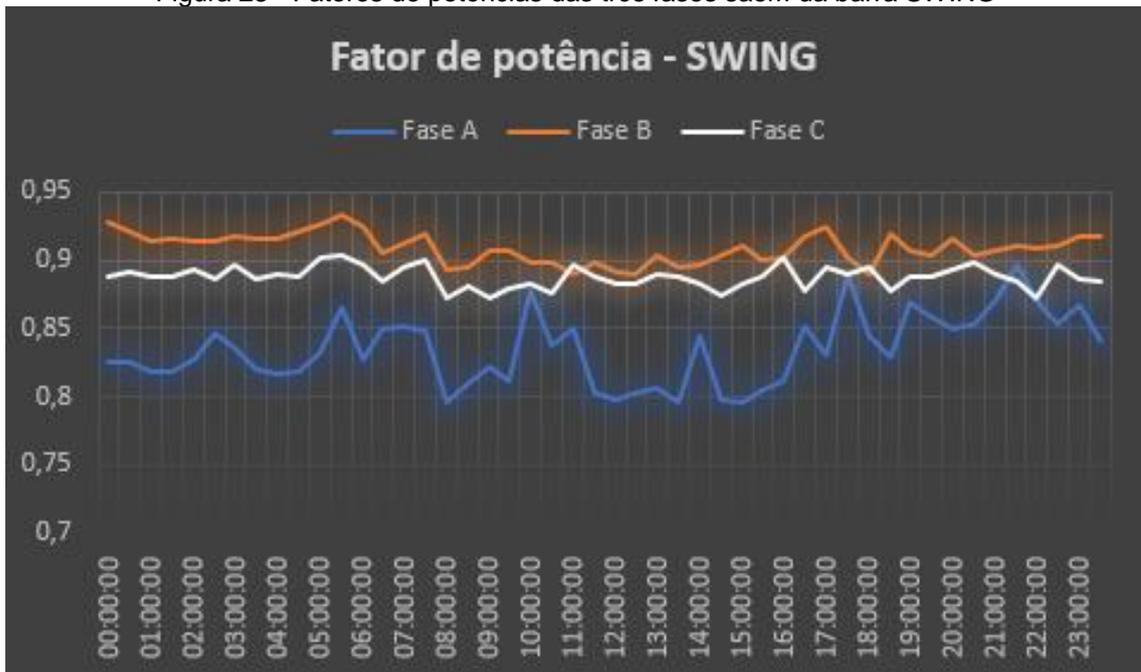
As figuras 27 e 28 ilustram o fluxo de potência e o fator de potência para a barra *SWING* e as figuras nomeadas de 29 até 37 são estas informações descritas acima apresentadas. Em que os eixos horizontais representam as horas do dia e o eixo vertical representam o fator de potência que é adimensional, a tensão dada em Volts ou a potência ativa com unidade em Watts, dependendo da figura.

Figura 27 – Potências ativas em Watts que saem da barra *SWING*



FONTE: O autor (2019)

Figura 28 - Fatores de potências das três fases saem da barra SWING



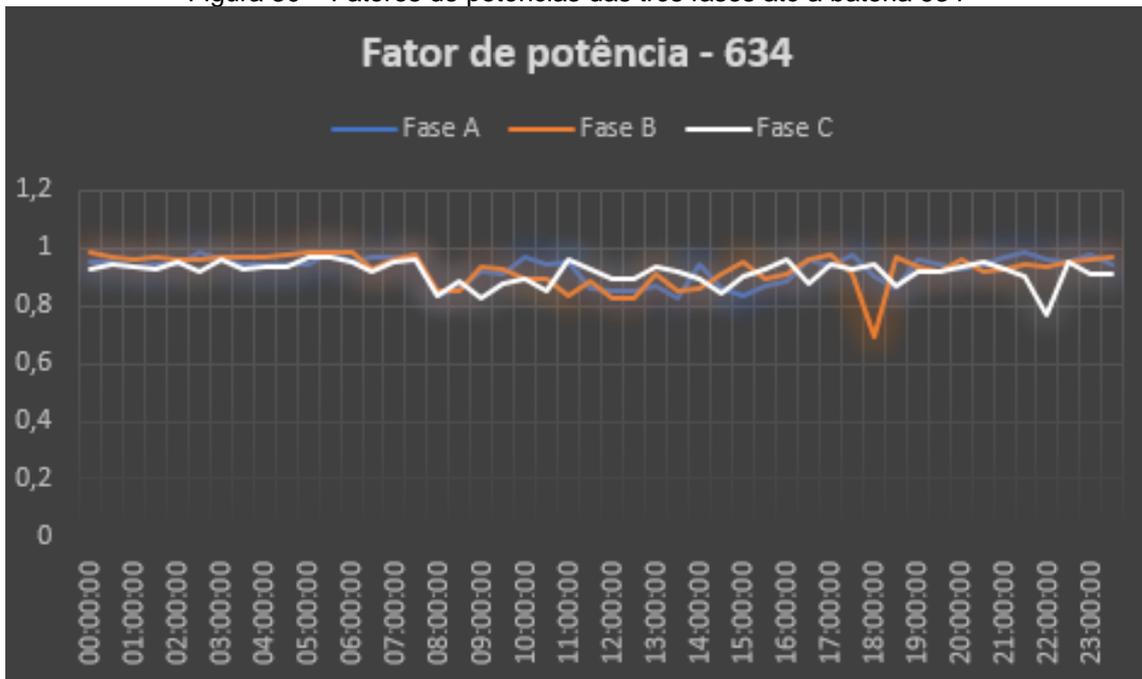
FONTE: O autor (2019)

Figura 29 - Potências ativas em Watts das três fases até a bateria 675



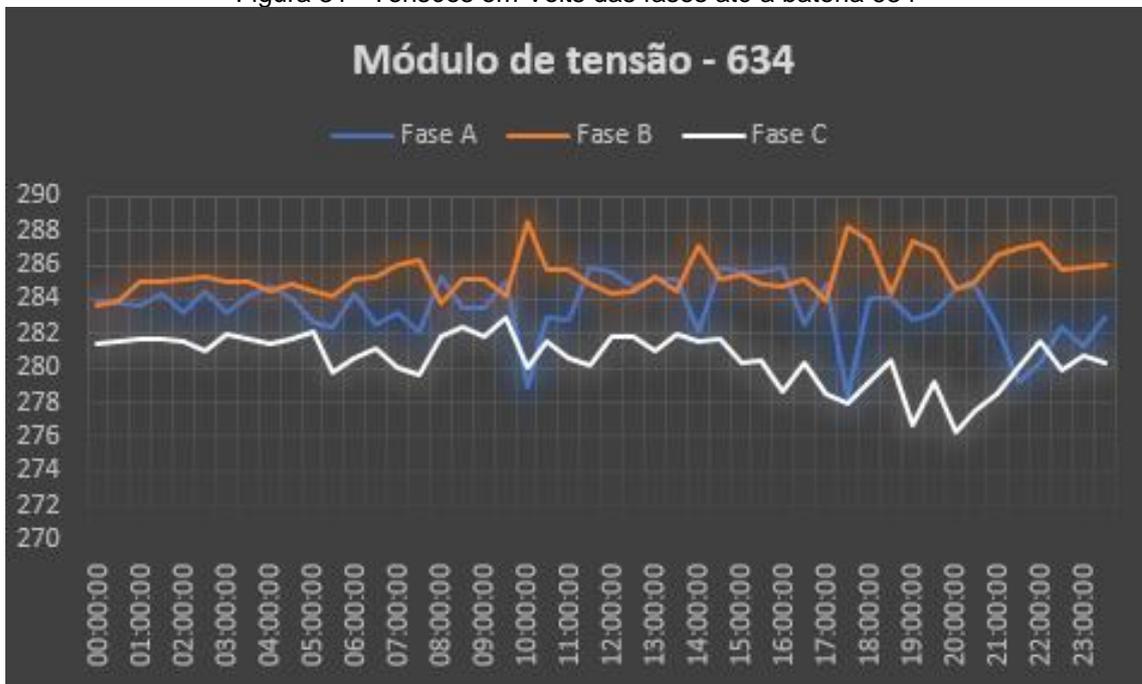
FONTE: O autor (2019)

Figura 30 – Fatores de potências das três fases até a bateria 634



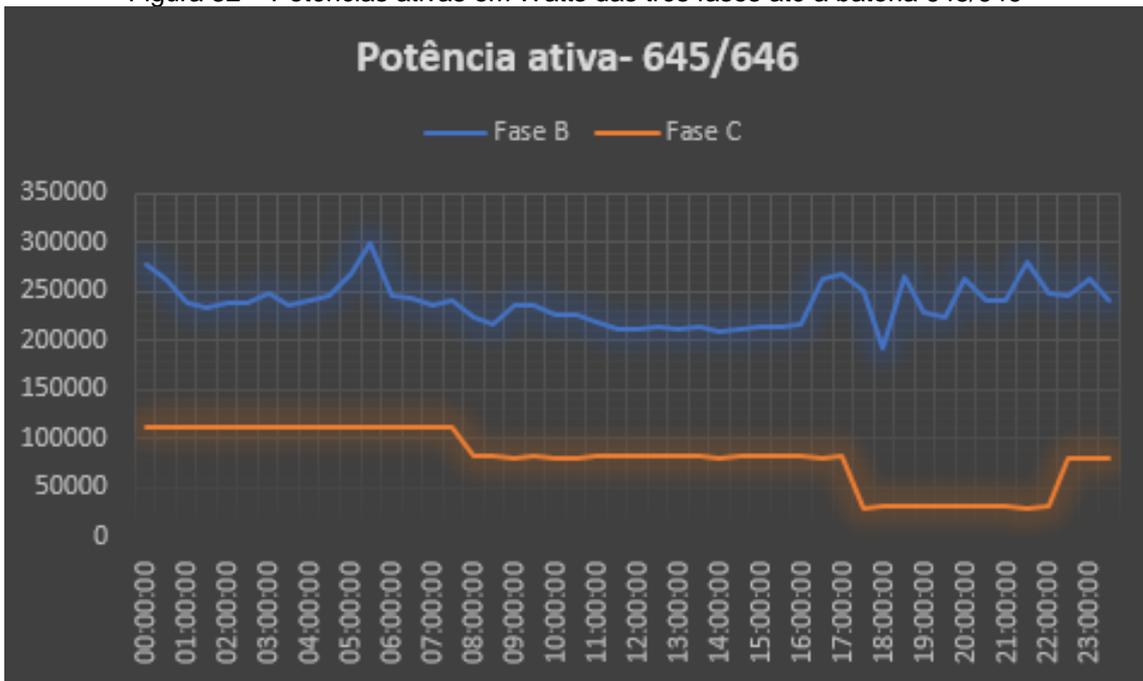
FONTE: O autor (2019)

Figura 31 – Tensões em Volts das fases até a bateria 634



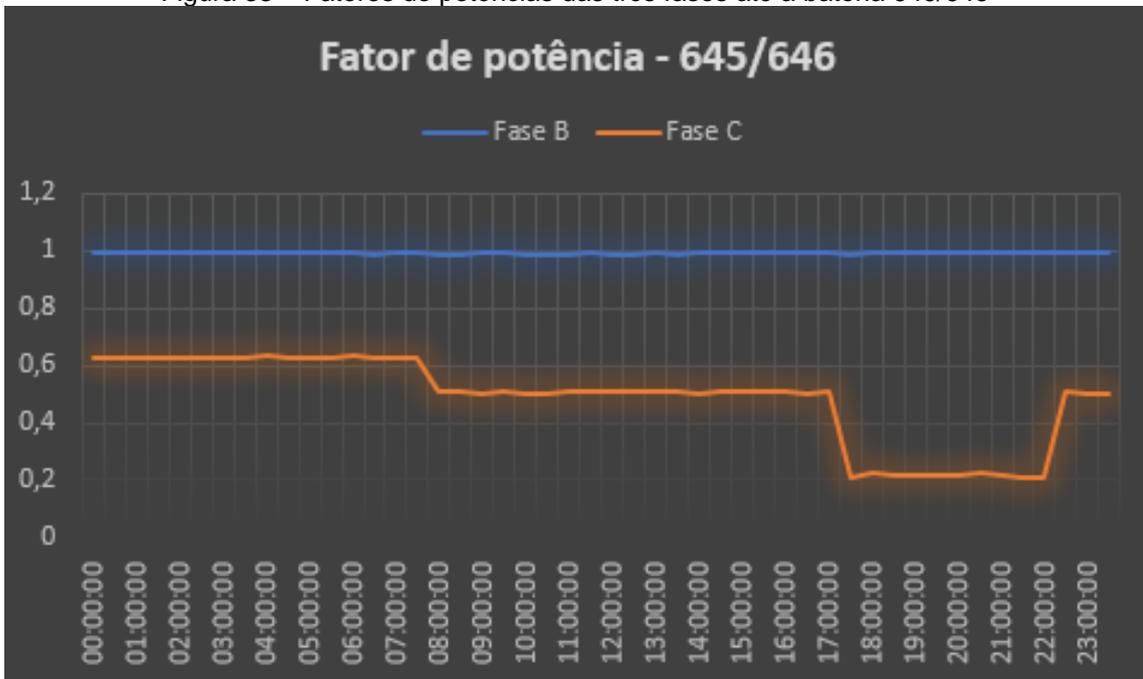
FONTE: O autor (2019)

Figura 32 – Potências ativas em Watts das três fases até a bateria 645/646



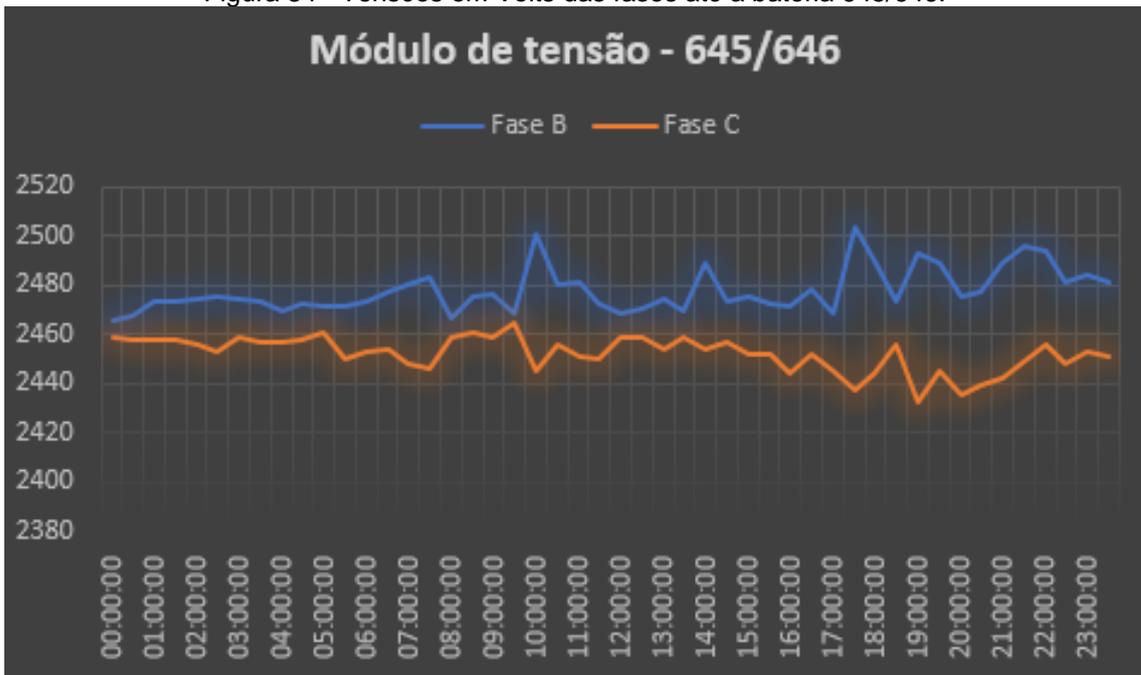
FONTE: O autor (2019)

Figura 33 – Fatores de potências das três fases até a bateria 646/646



FONTE: O autor (2019)

Figura 34 - Tensões em Volts das fases até a bateria 645/646.



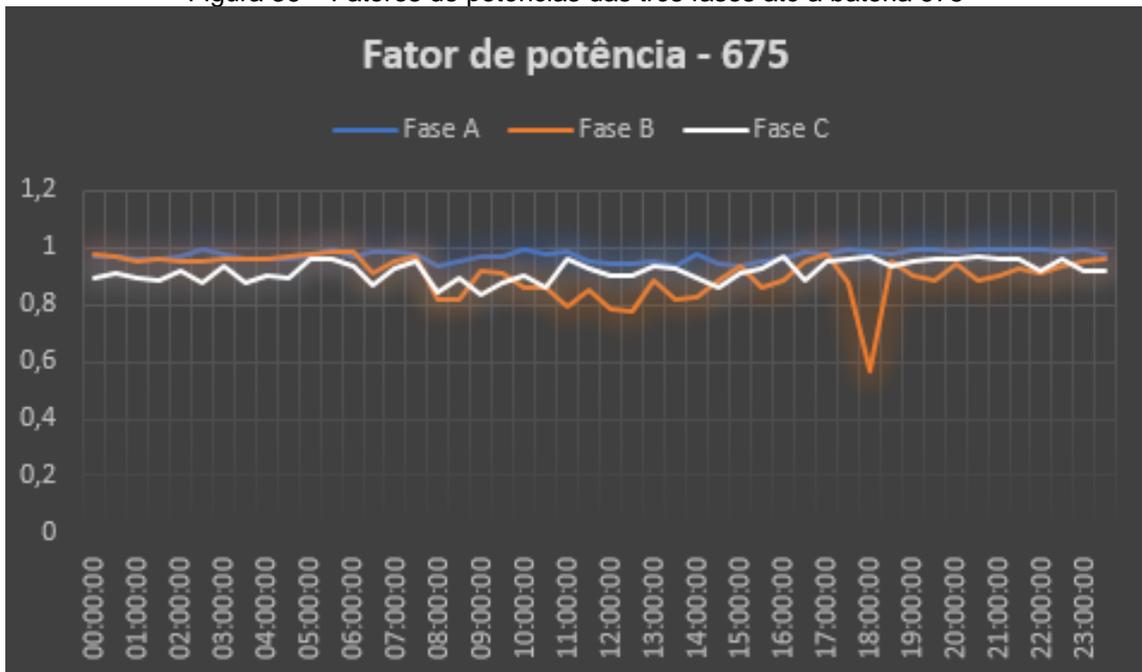
FONTE: O autor (2019)

Figura 35 – Potências ativas em Watts das três fases até a bateria 675



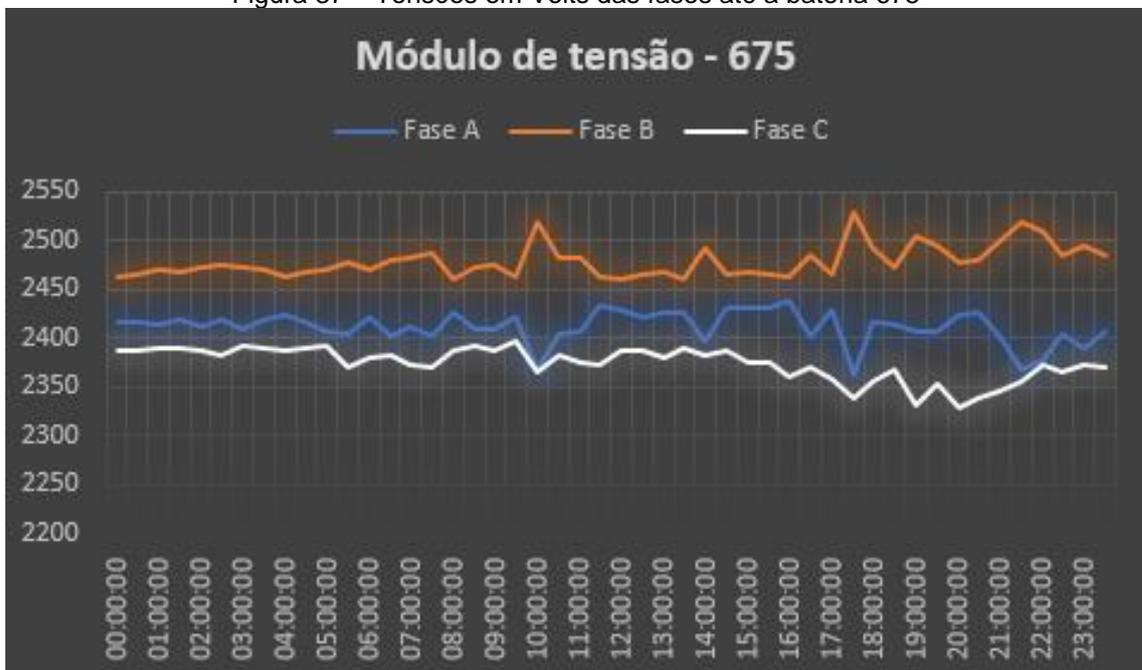
FONTE: O autor (2019)

Figura 36 – Fatores de potências das três fases até a bateria 675



FONTE: O autor (2019)

Figura 37 – Tensões em Volts das fases até a bateria 675



FONTE: O autor (2019)

A partir das figuras obtidas, foi possível levantar algumas análises. Comparando as figuras relacionadas as barras *SWING*, quando as baterias são carregadas, que vai do período das 0h00 até as 8h00, é possível notar um leve aumento no fator de potência, mais na madrugada (de manhã, das 6h até as 8h, terá comportamento parecido com a parte de descarregamento), por causa da bateria. Pois, na madrugada a maioria dos equipamentos de uma casa estão desligados e como a energia reativa dos equipamentos eletrônicos acaba sendo proporcionalmente maior que em horários de pico, as baterias inseridas por que necessitem de uma energia ativa injeta proporcionalmente relevante em relação as cargas das barras, acaba elevando um pouco o fator de potência. Mesmo que ainda acabem aumentando a energia reativa da rede, a energia ativa que é puxada para elas, acaba compensando e elevando o fator de potência nesse intervalo do dia comparado ao caso sem bateria.

Durante o período das 8h até as 17h30, as potências ativas acabam sendo as mesmas quando comparado ao caso sem bateria, já que a carga é a mesma e não existe descarregamento e carregamento das baterias nesse instante.

No período de descarregamento da bateria, das 17h30 até as 22h30 é bem no horário que as pessoas voltam e ficam na casa e os equipamentos são ligados, o que aumenta o fator de potência devido ao uso dos equipamentos eletrônicos. Só que esse aumento do fator de potência devido os equipamentos da casa, é proporcionalmente maior que aos das baterias ao descarregarem em suas respectivas barras. Se o descarregamento implica em um fator de potência menor que o caso sem baterias, gera um fator de potência global menor devido a essa diferença de proporcionalidade das energias ativa e reativa oriunda da bateria e da barra.

No final da noite, o comportamento do fator de potência volta a ser igual ao ser o caso sem bateria já que o ciclo de carregamento e descarregamento foi encerrado.

Analisando as potências ativas até as baterias próximas as cargas, foi possível ver o aumento de potência ativa chegando até a bateria, no horário de carregamento, comparado ao caso sem bateria, já que essa energia extra é usada para carregar a bateria. No período de carregamento a potência ativa que chega é menor já que a bateria vai alimentar o que a barra e o que falta, será complementado pela rede, já que ela enxerga como o sistema está configurado e o complementa

conforme essa análise. Nos outros horários o comportamento é bem parecido ao caso 1.

Em relação aos fatores de potência até as baterias, ocorre alterações significativas. Segue a lógica parecida a barra referência. No horário de carregamento da bateria, o fator de potência até elas se eleva um pouco devido a energia que as baterias necessitam para carregar. No descarregamento o fator de potência até a bateria cai significante devido ao dimensionamento das baterias que conseguem suprir uma parcela significativa da carga, que faz com a energia ativa diminuía muito, só que a energia reativa não diminui tanto, piorando esse fator de qualidade de transmissão de potência.

As tensões das barras não mudaram muito em relação ao caso base, a queda é basicamente imperceptível, o caso 3 vai demonstrar que não ocorreu variação da tensão, ou seja, não passaram no limite de 0,95 pu ou 1,05 pu. As baterias não foram fatores influenciadores para piorar qualidade de energia em relação a variação da tensão.

Pode-se notar que as baterias foram inseridas e atuaram dinamicamente de forma significantes no sistema, a lógica de mercado neste cenário foi implementada apenas contando o lucro ou prejuízo das baterias e da rede e o quanto cada nó gastou no total do dia sem seguir nenhuma restrição de bloqueio de transação se ocorreu comprometimento na qualidade da energia transmitida, mesmo que comprando o caso 2 com o caso base, foi visto que ocorreu queda do fator de potência em alguns instantes nas barras analisadas.

A figura 38 mostra os saldos e pagamentos realizados no sistema.

Figura 38 – Agentes do sistema para cada barra para o caso 2

<p>Node 675</p> <p>Pagamento total no dia pelo nó 675 foi de 128795.34077892842</p> <p>Capital acumulado pela rede no dia para o nó 675 foi de 131927.68355768084</p> <p>Capital acumulado pela bateria no dia para o nó 675 foi de 1436.7506695692873</p>
<p>Node 634</p> <p>Pagamento total no dia pelo nó 634 foi de 58867.57818804916</p> <p>Capital acumulado pela rede no dia para o nó 634 foi de 64092.522284926534</p> <p>Capital acumulado pela bateria no dia para o nó 634 foi de 2569.019073096204</p>
<p>Node 645</p> <p>Pagamento total no dia pelo nó 645 foi de 65274.31365488857</p> <p>Capital acumulado pela rede no dia para o nó 645 foi de 67500.38867699174</p> <p>Capital acumulado pela bateria no dia para o nó 645 foi de 986.1343755118805</p>
<p>Node 646</p> <p>Pagamento total no dia pelo nó 646 foi de 43837.64588879905</p> <p>Capital acumulado pela rede no dia para o nó 646 foi de 46009.2183271799</p> <p>Capital acumulado pela bateria no dia para o nó 646 foi de 1085.8950545916869</p>

FONTE: O autor (2019)

É possível ver uma leve diminuição de aproximadamente 20.000 unidades monetárias comparado com o caso 1.

O cenário com Blockchain que envolve gerenciamento da energia e vai controlar melhor o mercado para deixar não prejudicar a qualidade da energia transmitida.

### 5.3 CENÁRIO COM BLOCKCHAIN

Como dito anteriormente, para realizar a simulação com o Blockchain, foi utilizado a fundamentação teórica do referente ao Blockchain, menos em relação ao contrato inteligente que não foi implementado.

Basicamente para conseguir registrar os preços e separar o lucro ou prejuízo para as baterias e para a rede e o gasto para todos as barras, foi necessário adaptar o caso 2. É necessário agora calcular queda de tensão nas barras e o fator de potência que chega até as baterias e da barra *SWING*, ou seja, um programa que faça tratamento dos dados comparando os fatores de potência deste caso com o caso base e a partir disso, com as regras citadas na seção 4.2.3 aceite ou rejeite o bloco a cada meia hora.

Feito esse tratamento e separando os horários que foram aceitos os blocos, vai uma matriz para o Blockchain com os pagadores, recebedores e o valor de cada transação de acordo com o fluxo de energia. Esses valores irão rodar no programa e

irão escrever um bloco com todas as transações a cada meia hora, conforme o *timestamp* definido anteriormente. Assim, todas as transações são registradas, armazenadas e transparentes por causa de todos os conceitos do Blockchain.

Vale ressaltar que como foi dito no capítulo anterior, o Blockchain não consegue simular novamente o arquivo no momento de rejeição de qualquer bloco, devido a natureza do software de não ser forma dinâmica e simular o programa de simular um dia completo sem interrupção. O programa não consegue interromper e só pode recusar a transação apesar do fluxo de potência ter ocorrido.

A figura 39 mostra uma parte dos Blocos criados seguinte as regras estabelecidas.

Figura 39 – *Timestamp* da cadeia de blocos criada

```

Block Number: 17
Previous Hash: 0036681497447efb91306d7a9deed225884530d0b889dd883166c16b5f6de74d
Block Hash: 00203b43283791b4497f0f125b2109233dcc449975cb0bf4a855941411f9304e
timestamp: 2019-06-13 20:21:19.555786
Nonces: 1526
Transation from 57c8d002f1125b52e9eda88b11eed769efad9ee33aba2324d9f4d33c66261d02 to 393645f8bd31a198662900f337f165bcdd4de7d1446eb
f4339d32e3798252bab with amount of 2995.7595782502535
Transation from 861cab5aecf5f84dd8efbbd2b92438bdd792924636686b4fb780203623838889 to a51f81d9cc646bb9c7779c78b7f889eeb7b433d1fa73e
da444356b40d915ed4a with amount of 1266.6552380280457
Transation from fdd2a8086144ff7d9bca7656fe293672d6330b5425a8dc504a6e211e15e5b3d7 to ffb11480ffbf5eb638dc677fd570398f1eb728f77c3
1a68acd0aa1dad72f80 with amount of 1138.6879248064415
Transation from 379e35fdd0013440b789ed987aca23eb53a28f5c8cf9c0a5db077df4acf1421d to c17e3d7d047b0346307feddcf758e0393b315ac835de8
d6c049ef65cf7200ba8 with amount of 803.9906868422046

Block Number: 18
Previous Hash: 00203b43283791b4497f0f125b2109233dcc449975cb0bf4a855941411f9304e
Block Hash: 00020f23e3d090aac12a34bdf502173e77b134126b266a4f52da899359540985
timestamp: 2019-06-13 20:21:19.572787
Nonces: 67
Transation from 2e40d34390648bd1cbb4f0981d56c2c82b2d8bbd15a894eba18fcfb859f3c9ee to 69d19d990c21724fff720f93e7fefa9e4ca55349f41c1
02a8ddd003800272d55 with amount of 2467.976245596458
Transation from 155faf1d9ca0dd600d742b1ff8f7fb3a918a5014d47d3e058b96ceba97b9c3d8 to 5930ea6f3083e099a5f12d6c39776b308c4605d8c1250
b190fc3ca6d8929f584 with amount of 1100.5595179438035
Transation from a29b06d8ffd4a72926c1e0a573b98dac85997f3c9dfed12afdb4c08f387b738c to 78b5490566b8c0c7de9db96d50117f5b5e634d9ecb0f9
a49bc54d36ed4061356 with amount of 1109.306083068262
Transation from 07f943a161ffed653be7b4c7a784eb94140eac84f5fee89b204e0c9978b4c550 to afd6f61f40e4a348d18704027eb44bce7383ccc6ca730d
8ef5e49bfe020aef361 with amount of 805.9831747482389

```

FONTE: O autor (2019)

Porém, ao simular, percebeu que diversos blocos foram rejeitados. Como previsto, no caso 2, o fator de potência piorou muito nos horários de pico e nos momentos que as baterias descarregavam e assim os blocos foram rejeitados. Porém, em horários que teoricamente as baterias não estavam atuando, ocorreu rejeição de alguns blocos, isso ocorreu possivelmente pela criação de pontos de medição para a bateria e isso acarretou em perdas ativas para o sistema, e acabou sendo maior que 5%, principalmente para a barra *SWING* e o fator de potência acaba sendo abaixo do previsto.

Como também previsto, nenhum bloco foi rejeitado por queda de tensão. Na figura 40, são apresentados a lista dos blocos rejeitados.

Figura 40 – Blocos rejeitados pelo fator de potência

Blocos rejeitados por FP

O Bloco 16.0 que seria criado foi rejeitado por critério de fator de potência  
O Bloco 17.0 que seria criado foi rejeitado por critério de fator de potência  
O Bloco 18.0 que seria criado foi rejeitado por critério de fator de potência  
O Bloco 19.0 que seria criado foi rejeitado por critério de fator de potência  
O Bloco 21.0 que seria criado foi rejeitado por critério de fator de potência  
O Bloco 23.0 que seria criado foi rejeitado por critério de fator de potência  
O Bloco 26.0 que seria criado foi rejeitado por critério de fator de potência  
O Bloco 28.0 que seria criado foi rejeitado por critério de fator de potência  
O Bloco 29.0 que seria criado foi rejeitado por critério de fator de potência  
O Bloco 30.0 que seria criado foi rejeitado por critério de fator de potência  
O Bloco 31.0 que seria criado foi rejeitado por critério de fator de potência  
O Bloco 33.0 que seria criado foi rejeitado por critério de fator de potência  
O Bloco 34.0 que seria criado foi rejeitado por critério de fator de potência  
O Bloco 35.0 que seria criado foi rejeitado por critério de fator de potência  
O Bloco 36.0 que seria criado foi rejeitado por critério de fator de potência  
O Bloco 37.0 que seria criado foi rejeitado por critério de fator de potência  
O Bloco 38.0 que seria criado foi rejeitado por critério de fator de potência  
O Bloco 39.0 que seria criado foi rejeitado por critério de fator de potência  
O Bloco 40.0 que seria criado foi rejeitado por critério de fator de potência  
O Bloco 41.0 que seria criado foi rejeitado por critério de fator de potência  
O Bloco 42.0 que seria criado foi rejeitado por critério de fator de potência  
O Bloco 43.0 que seria criado foi rejeitado por critério de fator de potência  
O Bloco 44.0 que seria criado foi rejeitado por critério de fator de potência  
O Bloco 45.0 que seria criado foi rejeitado por critério de fator de potência  
O Bloco 46.0 que seria criado foi rejeitado por critério de fator de potência  
O Bloco 47.0 que seria criado foi rejeitado por critério de fator de potência

FONTE: O autor (2019)

A seguir, na figura 41, serão apresentados os valores totais de acumulados e gastos para todos os agentes da rede para cada barra que a bateria alimentou.

Figura 41 – Agentes do sistema para cada barra

<p>Node 675  Pagamento total no dia pelo nó 675 foi de 41523.21440764218  Capital acumulado pela rede no dia para o nó 675 foi de 44655.55718639459  Capital acumulado pela bateria no dia para o nó 675 foi de -3132.3427787524074</p>
<p>Node 634  Pagamento total no dia pelo nó 634 foi de 23106.616463466693  Capital acumulado pela rede no dia para o nó 634 foi de 28331.56056034406  Capital acumulado pela bateria no dia para o nó 634 foi de -5224.944096877372</p>
<p>Node 645  Pagamento total no dia pelo nó 645 foi de 24934.619146471894  Capital acumulado pela rede no dia para o nó 645 foi de 27160.69416857507  Capital acumulado pela bateria no dia para o nó 645 foi de -2226.0750221031717</p>
<p>Node 646  Pagamento total no dia pelo nó 645 foi de 17913.12813864543  Capital acumulado pela rede no dia para o nó 646 foi de 20084.70057702628  Capital acumulado pela bateria no dia para o nó 646 foi de -2171.5724383808515</p>

FONTE: O autor (2019)

Como pode ser visualizado, por não aceitar nenhum bloco no descarregamento da bateria, as baterias obtiveram prejuízo devido a pagar o carregamento para a rede.

Para a rede e cada nó, os preços foram cálculos somando apenas com os blocos aceitos, por isso o preço pago pelos nós e ganho pela rede estão mais baratos que os casos 1 e 2 em todas as barras.

Quando foi simulado com aceitação de pelo menos 20% para a barra *SWING* e para os nós, critério 3 da tabela 9, a maioria dos blocos foram aceitos, só apenas sete foram rejeitados em horários bem específicos, como no começo de horário de pico, no meio do horário de pico e entre outros.

Assim, com esse novo ajuste são apresentados nas figuras 42 e 43 os comparativos respectivamente as figuras 40 e 41.

Figura 42 – Blocos rejeitados com ajuste do critério 3

```
Blocos rejeitados por FP
O Bloco 18.0 que seria criado foi rejeitado por critério de fator de potência
O Bloco 19.0 que seria criado foi rejeitado por critério de fator de potência
O Bloco 29.0 que seria criado foi rejeitado por critério de fator de potência
O Bloco 30.0 que seria criado foi rejeitado por critério de fator de potência
O Bloco 36.0 que seria criado foi rejeitado por critério de fator de potência
O Bloco 37.0 que seria criado foi rejeitado por critério de fator de potência
O Bloco 44.0 que seria criado foi rejeitado por critério de fator de potência
```

FONTE: O autor (2019)

Figura 43 – Agentes do sistema para cada barra com ajuste do critério 3

```
Node 675
Pagamento total no dia pelo nó 675 foi de 109850.96002033092
Capital acumulado pela rede no dia para o nó 675 foi de 112983.30279908334
Capital acumulado pela bateria no dia para o nó 675 foi de 116.50642084835079

Node 634
Pagamento total no dia pelo nó 634 foi de 51255.59535437536
Capital acumulado pela rede no dia para o nó 634 foi de 56480.53945125272
Capital acumulado pela bateria no dia para o nó 634 foi de 334.02705302905133

Node 645
Pagamento total no dia pelo nó 645 foi de 55176.460089636385
Capital acumulado pela rede no dia para o nó 645 foi de 57402.53511173956
Capital acumulado pela bateria no dia para o nó 645 foi de 67.02987441751958

Node 646
Pagamento total no dia pelo nó 645 foi de 37143.26762830538
Capital acumulado pela rede no dia para o nó 646 foi de 39314.840066686236
Capital acumulado pela bateria no dia para o nó 646 foi de 155.26248736089576
```

FONTE: O autor (2019)

O lucro da rede está menor que o caso 2 devido ao bloqueio de alguns nós na rede.

Porém, neste caso, a bateria conseguiu obter lucro em todas as barras e se não existisse bloqueio de nenhum nó, era possível ver que o preço total pago pelas barras seria menor, devido ao preço da bateria ser menor nos horários de pico e ser o único horário que elas descarregam.

Após os resultados obtidos, chegou-se em algumas ressalvas para fazer. A ideia do trabalho foi realizada dentro do esperado, conseguiu-se modelar o sistema de precificação e registro de todos os fluxos de potência e conseqüentemente, as transações que irão ocorrer e por fim registradas no Blockchain. Também conseguiu através desse trabalho a importância do registro através dos blocos e como a bateria e a rede podem lucrar com esse sistema, como o consumidor economiza dinheiro devido aos preços em horário de pico serem mais baratos da bateria do que se fosse integralmente alimentado pela rede e como isso será registrado com transparência para todas as partes com intuito de dar transparência ao mercado.

Porém, devido ao software escolhido, não foi possível programar a lógica do Blockchain como planejado, ou seja, não foi possível criar um leilão de energia para um intervalo de tempo definido e quando o bloco rejeitasse a transação, voltasse a mesma nesse intervalo de rejeição e modificasse conforme os limites que poderiam ser aceitos pela rede.

Outro fator que poderia ser melhorado, era escolher um sistema de barras com capacidade para ser instalado baterias maiores para não limitar a bateria devido ao fluxo reverso, e assim ver a diferença entre lucro entre cada uma.

Uma terceira alternativa, seria a inserção de capacitores que injetar energia e desligar de forma automática conforme a necessidade da rede em um determinado instante de tempo para que se trabalhe sempre visando otimizar para ter a melhor qualidade de transmissão de energia em um sistema com bateria. Esse tipo de configuração só poderia ser feito em outro software, não foi possível realizar isso no GridLAB-D.

## 6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

O trabalho apresentado possui um intuito de a partir de um sistema de 13 barras do IEEE, mostrar como este sistema irá se comportar com inserção de baterias de tamanhos diferentes e mostrar o papel que o Blockchain, com um modelo mercadológico em todas as etapas, para precificar, separar e registrar (esses dois no terceiros caso apenas) todas as transações oriundas da rede para todos os agentes envolvidos.

Para começar a executar o trabalho, foi necessário um estudo sobre o Blockchain, desde seu propósito, até o as partes técnicas de programação para criar todo o ambiente necessário.

Após essa etapa, foi estudado o software GridLAB-D para ver como funcionava e ver suas limitações para adaptações conforme as ideias previamente desenvolvidas para a lógica de mercado para os casos 2 e 3 e possíveis comunicações com o Blockchain para interrupção ou aceitação para qualquer intervalo de tempo caso não fosse atendido os critérios de qualidade de energia estabelecidos.

Após a análise, foram feitas algumas adaptações para que a ideia principal fosse executada e assim mostrar os benefícios do Blockchain.

Propostas para pode ser implementada a ideia foram apresentadas como mudança para um software mais dinâmico para inserção de ligar capacitores para diminuir a energia reativa até os trechos das baterias e assim se adequar as regras do fator de potência e também de mudar para um sistemas de barras que permita inserir baterias de capacidades de armazenamento maiores com intuito de comparação de como elas vão atuar no sistema e sua diferença de precificação.

Com as propostas do parágrafo acima, uma ideia para trabalhos futuros, seria o trabalho ser executado com as mesmas premissas, só que como outro software mais dinâmico e com um sistema de barras que permite baterias maiores para ter toda essa comparação citada e implementar uma lógica de mercado mais complexa e dinâmica. Assim, poderia ver se o Blockchain possa mostrar maiores benefícios e com uma lógica de mercado dinâmica, viraria uma ideia de um grande valor para ser implementada no cenário de energia elétrica de um futuro próximo. Um mercado de livre comercialização de energia que pode beneficiar a todos os usuários com um preço mais baixo da energia e também a rede, ajudando a fornecer energia em

horários de pico ou de época de baixa produção de grandes centros de produção hidrelétrica como existe no Brasil.

## REFERÊNCIAS

BANGUERO, E. et al. **A Review on Battery Charging and Discharging Control Strategies** : Application to Renewable Energy Systems. p. 1–15, 2018.

BUTERIN, V. **White Paper - A next generation smart contract & decentralized application platform**. Disponível em: <<https://whitepaperdatabase.com/ethereum-eth-whitepaper/>>.

CCEE. **Veja se sua empresa enquadra**. Disponível em: <[https://www.ccee.org.br/portal/faces/pages\\_publico/como-participar/participe/veja\\_se\\_enquadra\\_consumidor?\\_adf.ctrl-state=13ynpacme2\\_1&\\_afLoop=894733627858101#!%40%40%3F\\_afLoop%3D894733627858101%26\\_adf.ctrl-state%3D13ynpacme2\\_5](https://www.ccee.org.br/portal/faces/pages_publico/como-participar/participe/veja_se_enquadra_consumidor?_adf.ctrl-state=13ynpacme2_1&_afLoop=894733627858101#!%40%40%3F_afLoop%3D894733627858101%26_adf.ctrl-state%3D13ynpacme2_5)>. Acesso em: 14 mar. 2019.

CHAGAS, M. W. P. Novas tecnologias para avaliação de baterias. 2007.

ETHEREUM. **Solidity**. Disponível em: <<https://solidity.readthedocs.io/en/latest/>>. Acesso em: 4 mar. 2019.

**GridLAB-D**. Disponível em: <<https://www.gridlabd.org/>>. Acesso em: 26 abr. 2019.

KOIRALA, B. P.; OOST, E. VAN; WINDT, H. VAN DER. Community energy storage : A responsible innovation towards a sustainable energy system ? **Applied Energy**, v. 231, n. June, p. 570–585, 2018.

LONG, C. et al. Peer-to-peer energy sharing through a two-stage aggregated battery control in a community Microgrid. **Applied Energy**, v. 226, n. April, p. 261–276, 2018.

LÜTH, A. et al. Local electricity market designs for peer-to-peer trading : The role of battery. **Applied Energy**, v. 229, n. August, p. 1233–1243, 2018.

MARR, B. **35 exemplos práticos da aplicação de blockchain**. Disponível em: <<https://forbes.uol.com.br/negocios/2018/05/30-exemplos-praticos-da-aplicacao-de-blockchain/#foto2>>. Acesso em: 1 mar. 2019.

MORSTYN, T.; MCCULLOCH, M. D. Multi-Class Energy Management for Peer-to-Peer Energy Trading Driven by Prosumer Preferences. **IEE Transactions on Power Systems**, v. 8950, n. c, p. 1–9, 2018.

MOSELEY, P. T.; GARCHE, J. **Electrochemical Energy Storage for Renewable Sources and Grid Balancing**. [s.l: s.n.].  
NAKAMOTO, S. White Paper - Bitcoin : A Peer-to-Peer Electronic Cash System. p. 1–9, 2009.

NGUYEN, S. et al. Optimizing rooftop photovoltaic distributed generation with battery storage for peer-to-peer energy trading. **Applied Energy**, v. 228, n. April 2018, p. 2567–2580, 2018.

PAUDEL, A. et al. Peer-to-Peer Energy Trading in a Prosumer Based Community Microgrid : A Game-Theoretic. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. PP, n. c, p. 1, 2018.

PRINCETOWN, U. **Bitcoin and Cryptocurrency Technologies**.

PURKAYASTHA, S. **Compare eight Blockchain platform to kick start your next project**. Disponível em: <<https://radiostud.io/eight-blockchain-platforms-comparison%3E>>. Acesso: 20 de março de 2019>.

SOLUTIONS, C. F. C. A. E. **Renewable Energy**. Disponível em: <<https://www.c2es.org/content/renewable-energy/>>.

TROUNG, C. N. et al. ScienceDirect ScienceDirect Multi-Use Multi-Use of of Stationary Stationary Battery Battery Storage Storage Systems Systems with with Blockchain Blockchain Based Markets Based Markets u , the Assessing feasibility using the temperature function for distri. **Energy Procedia**, 2018.

YAMAKAWA, E. K. Sistema de controle nebuloso para bancos de capacitores automáticos aplicados em alimentadores de distribuição de energia elétrica. 2007.

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

ZHANG, C. et al. Peer-to-Peer energy trading in a Microgrid. **Applied Energy**, v. 220, n. February, p. 1–12, 2018.