



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO**  
**EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**CONTROLE PRIMÁRIO DE MICRORREDES EM CONDIÇÕES**  
**OPERATIVAS DE ILHAMENTO COM INSERÇÃO DE VEÍCULOS**  
**ELÉTRICOS**

**Amanda Pereira Chiaradia**

**Novembro de 2022**

**Itajubá – MG**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO**  
**EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**Amanda Pereira Chiaradia**

**CONTROLE PRIMÁRIO DE MICRORREDES EM CONDIÇÕES**  
**OPERATIVAS DE ILHAMENTO COM INSERÇÃO DE VEÍCULOS**  
**ELÉTRICOS**

**Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica como parte dos requisitos para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica.**

**Área de Concentração: Sistemas Elétricos de Potência**

**Orientador: Antonio Carlos Zambroni de Souza, Ph.D**

**Coorientador: Maurício Campos Passaro, D.**

**Novembro de 2022**

**Itajubá – MG**

*A Fábio Chiaradia Júnior e Andréia Luzia Pereira Chiaradia por serem a razão da minha vida.*

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus por nunca ter me deixado desistir, apesar de todos os obstáculos e após várias crises de ansiedade.

Aos meus pais, Fábio e Andréia, e minha irmã, Kamilla, por acreditarem no meu sonho, por sempre me apoiarem e por todo o carinho e preocupação de sempre.

Aos meus orientadores, professor Antonio Carlos Zambroni de Souza e Maurício Campos Passaro por tanta ajuda e preocupação. Que mesmo com a pandemia atrapalhando nossos planos, conseguimos ter uma boa relação.

A minha professora de inglês, Zilma Moura de Castro, por toda a força e conselhos e por sempre acreditar em mim e na minha capacidade.

A CAPES, pela bolsa fornecida durante todo o estudo.

A todos os colegas que a UNIFEI me presenteou, que mesmo a distância devido à pandemia, conseguimos trabalhar juntos.

## RESUMO

A cada ano que passa o sistema elétrico tem evoluído substancialmente. Isso se dá pelo aumento da inserção de fontes renováveis na rede, que inclui o conceito de smart-grids. As microrredes podem operar de forma ilhada ou conectada à rede principal, e são uma ótima alternativa para garantir qualidade e confiabilidade no fornecimento de energia elétrica.

Nesta dissertação, é dada uma atenção especial às microrredes com problemas de ilhamento quanto à variação de demanda, e ao conceito de veículos elétricos (VE) conectados à rede. Utilizam-se os veículos elétricos como armazenadores de energia para fornecer energia dentro dos limites estipulados e analisa se há necessidade da sua utilização no momento do ilhamento. Ainda, em casos de um ponto de operação não tolerável, utiliza-se o controle primário de frequência e tensão para a correção da operação do sistema.

Os resultados apresentados aqui têm como base o sistema IEEE 37-Nodes Test Feeder, que para torná-lo equivalente à uma microrrede foram feitas algumas modificações. Nesse sistema, pode-se alterar as curvas de carga da rede, incluir veículos elétricos, quantidade de VEs a serem carregados e suas respectivas baterias.

Com isso, espera-se que as ferramentas utilizadas aqui sejam capazes de analisar e gerenciar o sistema quando houver situações de ilhamento.

## **ABSTRACT**

With each passing year the electrical system has evolved substantially. This is due to the increase in the inclusion of renewable sources in the network, which includes the concept of smart grids. Microgrids can operate isolated or connected to the main network and are a great alternative to ensure quality and reliability in the supply of electricity.

In this dissertation, special attention is given to microgrids with islanding problems regarding demand variation, and the concept of electric vehicles connected to the grid. Electric vehicles are used as energy storage to supply energy within the stipulated limits and analyze whether there is a need for their use at the time of islanding. Also, in cases of a non-tolerable operating point, the primary control of frequency and voltage is used to correct the operation of the system.

The results presented here are based on the IEEE 37-Nodes Test Feeder system, which to make it equivalent to a microgrid, some modifications were made. In this system, it is possible to change the network charge curves, including electric vehicles, number of EVs to be charged and their respective batteries.

With this, it is expected that the tools used here will be able to analyze and manage the system when there are islanding situations.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Representação do Sistema Elétrico de Potência [1].....	13
Figura 2- Expansão em Capacidade e em Energia da Geração Distribuída [3]. .....	14
Figura 3- Típica Estrutura de Microrrede [17]. .....	16
Figura 4 – Comportamento da demanda da energia em relação à frequência. ....	28
Figura 5- Modelo de um sistema de Distribuição com Veículos Elétricos Plugáveis [46]. Adaptado/Modificado.....	32
Figura 6- Diagrama dos tipos de baterias para veículos elétricos. ....	33
Figura 7- Energia e potência específicas para os diferentes tipos de baterias [55]. ....	35
Figura 8- Curva de carga típica de uma bateria de íon de lítio.....	46
Figura 9- Sistema Teste Modificado. ....	48
Figura 10- Demanda de Potência Ativa durante todo o dia.....	50
Figura 11- Demanda de Potência Ativa entre 22h00 e 06h00.....	51
Figura 12- Tensões nas barras em modo conectado.....	53
Figura 13- Geração nos barramentos em modo conectado.....	54
Figura 14- Perfil de tensão nas barras em modo ilhado .....	61

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Parâmetros fornecidos pelo fabricante. ....	23
Tabela 2- Parâmetros calculados. ....	24
Tabela 3- Classificação dos consumidores. ....	26
Tabela 4- Autonomia dos Veículos Elétricos [44]. ....	31
Tabela 5- Capacidade das baterias em relação aos tipos de veículos elétricos [44]. ....	35
Tabela 6- Veículos Elétricos considerados. ....	45
Tabela 7- Dados dos Geradores Despacháveis [8] ....	48
Tabela 8- Dados dos Geradores Não Despacháveis [8] ....	48
Tabela 9- Divisão das Cargas em Grupos de Consumo [8]. ....	49
Tabela 10- Divisão das Cargas de acordo com a Prioridade [8] ....	49
Tabela 11- Demanda de Potência Ativa das Cargas Comerciais sem o carregamento dos veículos elétricos ....	51
Tabela 12- Demanda de Potência Ativa das Cargas Comerciais com o carregamento dos veículos elétricos ....	52
Tabela 13- Potências dos meios de gerações. ....	54
Tabela 14- Cargas do sistema no momento da desconexão ....	55
Tabela 15- Potências dos geradores no momento da desconexão ....	55
Tabela 16- Valores de SoC das baterias ....	56
Tabela 17- Potências dos geradores no momento da desconexão considerando SoC dos veículos ....	56
Tabela 18- Cargas do sistema no momento da desconexão ....	57
Tabela 19- Potências dos geradores no momento da desconexão ....	57
Tabela 20- Potências dos geradores no momento da desconexão considerando SoC dos veículos ....	58
Tabela 21- Cargas do sistema no momento da desconexão ....	59
Tabela 22- Potências dos geradores no momento da desconexão ....	59
Tabela 23- Potências dos geradores no momento da desconexão considerando SoC dos veículos ....	60

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
DA	Dispositivo Armazenador de Energia
SEP	Sistema Elétrico de Potência
GD	Geração Distribuída
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronic Engineers</i>
PDE	Plano Decenal de Energia
VE	Veículos Elétricos
QEE	Qualidade de Energia Elétrica
PRODIST	Procedimentos de Distribuição
MR	Microrrede(s)
VEP	Veículos Elétricos <i>Plug-in</i>
VEHP	Veículos Elétricos Híbridos <i>Plug-in</i>
VEB	Veículos Elétricos a Bateria ou Veículos Elétricos <i>Plug-in</i>
VEH	Veículos Elétricos Híbridos
VRLA	<i>Valve- Regulated Lead-Acid</i>
AGM	<i>Adsorbed Glass Mat</i>
LCO	Óxido de lítio-cobalto
NCA	Lítio-níquel-cobalto-alumínio
NMC	Lítio-níquel-manganês-cobalto
LMO/LTO	Lítio manganês spinel
LFP	Fosfato de ferro-lítio
V2G	<i>Vehicle-to-grid</i>
G2V	<i>Grid-to-vehicle</i>
PEC	<i>Power Electronic Converter</i>
VSI	<i>Voltage Source Inverter</i>
SoC	<i>State of Charge</i>

## SUMÁRIO

<b>RESUMO</b> .....	<b>6</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>7</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	<b>8</b>
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	<b>9</b>
<b>LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS</b> .....	<b>10</b>
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>13</b>
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO PROBLEMA .....	16
1.2 REVISÃO DA LITERATURA .....	18
1.3 JUSTIFICATIVA .....	20
1.4 OBJETIVOS .....	21
1.4.1 <i>Objetivos Gerais</i> .....	21
1.4.2 <i>Objetivos Específicos</i> .....	21
1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO .....	21
<b>2. COMPONENTES</b> .....	<b>23</b>
2.1 GERADORES .....	23
2.1.1 <i>Painel Fotovoltaico</i> .....	23
2.1.2 <i>Turbina Eólica</i> .....	24
2.1.3 <i>Baterias</i> .....	25
2.1.4 <i>Cargas</i> .....	25
2.2 CONVERSORES ELETRÔNICOS DE POTÊNCIA (PEC) .....	26
2.2.1 <i>Modo VSI (Voltage Source Inverter)</i> .....	26
2.2.2 <i>Modo PQ</i> .....	27
2.2.3 <i>Modo Volt-Var</i> .....	27
2.2.4 <i>Modo PV</i> .....	27
2.3 CONTROLES .....	28
2.3.1 <i>Controle Primário</i> .....	28
2.3.2 <i>Controle Secundário</i> .....	28
2.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	29
<b>3. VEÍCULOS ELÉTRICOS EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO</b> .....	<b>30</b>
3.1 BATERIAS .....	32
3.1.1 <i>Bateria Chumbo-ácido (PbA)</i> .....	33
3.1.2 <i>Níquel-Metal-Hidreto (NiMH)</i> .....	34
3.1.3 <i>Zebra (Sódio-Metal-Cloreto)</i> .....	34
3.1.4 <i>Íon-Lítio</i> .....	34
3.2 BENEFÍCIOS DOS VEÍCULOS ELÉTRICOS .....	35
3.3 AGREGADORES .....	36
3.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	36
<b>4. FLUXO DE POTÊNCIA</b> .....	<b>37</b>

4.1	MÉTODO DE NEWTON-RAPHSON .....	37
4.2	SIMPLIFICAÇÕES .....	37
4.3	EQUAÇÕES ALGÉBRICAS .....	38
4.4	O ALGORITMO.....	43
4.4.1	<i>Microrredes Ilhadas</i> .....	43
4.4.2	<i>Microrredes em modo conectado</i> .....	43
4.5	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	44
<b>5.</b>	<b>PROPOSTA .....</b>	<b>45</b>
<b>6.</b>	<b>SISTEMA TESTE .....</b>	<b>47</b>
6.1	SISTEMA TESTE UTILIZADO .....	47
6.2	VALIDAÇÃO DO ESTUDO.....	49
6.2.1	<i>Veículos elétricos como cargas – Microrrede conectada</i> .....	50
6.2.2	<i>Veículos elétricos como fonte – Microrrede Ilhada</i> .....	54
<b>7.</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>62</b>
7.1	TEMAS PARA TRABALHOS FUTUROS .....	63
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>64</b>
	<b>ANEXO I.....</b>	<b>69</b>

## 1. INTRODUÇÃO

O setor elétrico desencadeou várias transformações ao passar dos anos. Isso se deu pelo novo perfil de consumo da geração atual, que inclui alguns aspectos, como: redes inteligentes, tecnologias de geração de energia limpa, tecnologias para o consumo eficiente de energia e até mesmo a utilização de veículos elétricos. Todos esses aspectos estão designados a uma crescente sustentabilidade do setor. Porém, o Sistema Elétrico de Potência (SEP) possui quase a mesma construção desde a sua estrutura original, mesmo com todas essas mudanças.

A melhora significativa dos subsistemas do sistema elétrico, sendo eles, geração, transmissão e distribuição de energia, se deram pelos avanços tecnológicos.

O sistema elétrico de potência é dividido em 3 subsistemas:

**Geração:** transforma outras formas de energia em energia elétrica, como: parques eólicos e solares, usinas hidrelétricas, termoelétricas e nucleares.

**Transmissão:** liga os centros de consumo à geração.

**Distribuição:** distribui a energia elétrica aos consumidores. Podem ser divididas em primárias e secundárias.

A Figura 1 faz a representação do sistema elétrico de potência com os três subsistemas.

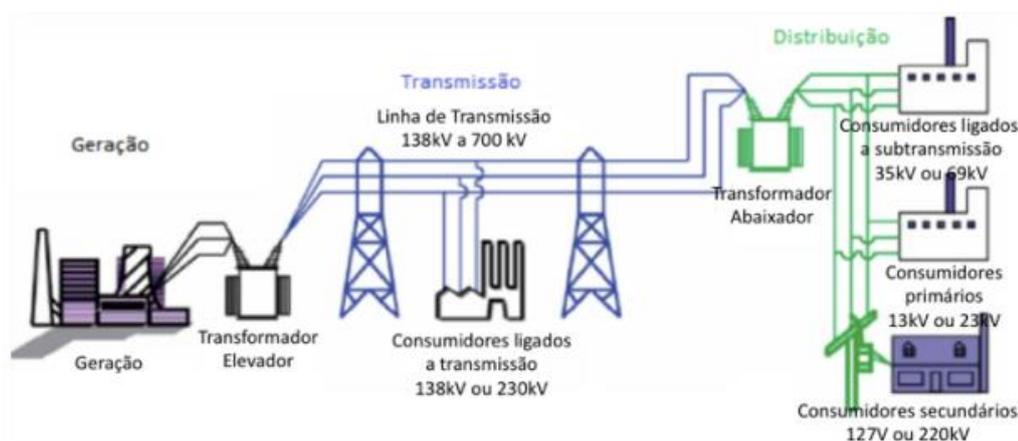


Figura 1- Representação do Sistema Elétrico de Potência [1].

Alguns fatores que estão diretamente ligados a melhora do sistema elétrico, são: velocidade crescente do desenvolvimento regional, apoio da sociedade à redução de emissão de gases prejudiciais ao efeito estufa e penetração de tecnologias de geração de energia renováveis e suas reduções de custo [2]. Com isso, devido a ideia de o consumidor gerar sua própria energia com a utilização de recursos renováveis, o Brasil tem tido um grande crescimento na quantidade de potência instalada [3].

Com o desejo dos consumidores de reduzir o custo e melhorar a confiabilidade do suprimento da energia elétrica, com o aproveitamento do aumento das tecnologias a partir de fontes renováveis e a redução dos impactos ambientais de geração, tem-se a importância da inserção do conceito de Geração Distribuída (GD) [4]. Ela é definida como a geração e armazenamento de energia elétrica de uso integrado ou de forma isolada, podendo ser conectada diretamente à rede de distribuição ou ao próprio consumidor [5].

A Figura 2 mostra um histórico da expansão em capacidade e em energia da geração distribuída em uma previsão futura. É possível observar que ao longo dos anos esse aumento será cada vez maior e que a tecnologia solar é a principal fonte desse segmento, que equivale a 93% de toda essa expansão.



Figura 2- Expansão em Capacidade e em Energia da Geração Distribuída [3].

As definições para redes inteligentes incluem a comunicação nas redes de transmissão e distribuição de energia elétrica com as aplicações de tecnologias digitais, com o intuito de aumentar o nível e controle e operação do sistema [6]. Seu objetivo é de prover melhorias na rede elétrica, como confiabilidade, boa qualidade, eficiência comercial e energética, gestão e automação da energia elétrica. Isso é possível utilizando a tecnologia de comunicação e informação.

As principais características relacionadas às redes inteligentes são [7]:

- Autorrecuperação: possui a capacidade de detectar, analisar, responder, restaurar e isolar faltas na rede com a menor quantidade de danos;

- Maior participação do Consumidor: possui a habilidade de incluir os equipamentos e o comportamento dos consumidores nos processos de planejamento e operação da rede;
- Tolerância a ataques externos: é capaz de mitigar e resistir a ataques físicos;
- Qualidade de energia: proporcionam confiabilidade, qualidade, sustentabilidade e economia dentro do ambiente do consumidor final;
- Acomodar uma grande variedade de fonte e demanda: é capaz de integrar de forma transparente uma variedade de fontes de energia de várias dimensões e tecnologias;
- Reduzir o impacto ambiental do sistema produtor de eletricidade: reduz perdas por utilizar fontes de baixo impacto ambiental.

Em uma análise de fluxo de potência dentro do conceito de redes inteligentes, podem-se planejar melhorias e ampliações do sistema elétrico, pois a operação satisfatória está diretamente relacionada a novas interconexões do sistema, adição de novas usinas, novas linhas de transmissão e introdução de novas cargas. E, o mais importante, o sistema passa a ser bidirecional (com a presença do autoprodutor) [8]. Com isso, têm-se o conceito de microrredes.

As microrredes são definidas como subsistemas com grupos de armazenadores de energia, geradores e consumidores interconectados na distribuição. São chamadas de redes inteligentes, pois garantem confiabilidade, qualidade e sustentabilidade ao sistema; e possuem flexibilidade em operar de forma conectada ou de forma ilhada. Elas garantem um avanço significativo em relação à melhoria dos Sistemas Elétricos de Potência [9].

A Figura 3 mostra uma típica estrutura de microrrede, tendo como fontes distribuídas as fontes solar e eólica de energia, geradores a diesel, cargas locais e dispositivos armazenadores de energia.

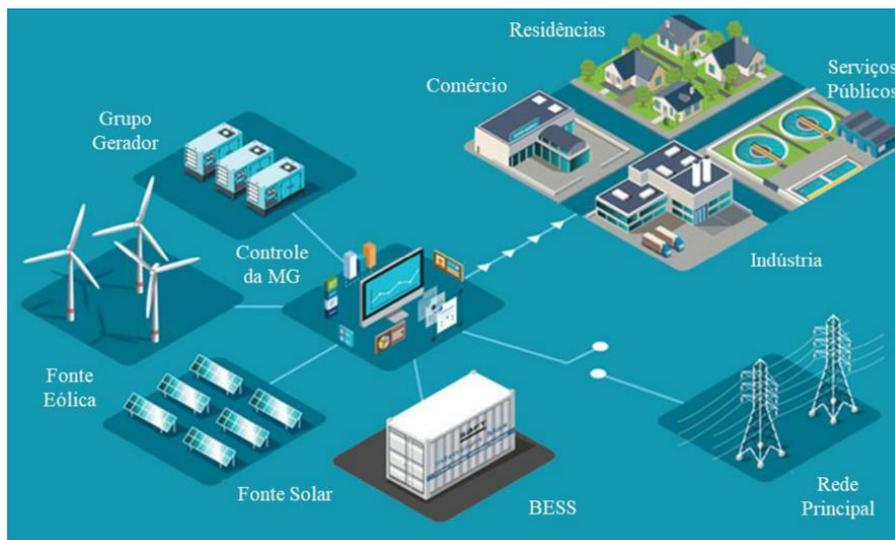


Figura 3- Típica Estrutura de Microrrede [17].

### 1.1 Contextualização do Problema

A evolução da matriz elétrica está em contínuo crescimento, visto que apresenta uma crescente demanda de energia, precisando de um sistema de transformação e obtenção cada vez mais eficaz. Porém, se tratando do uso de novas fontes, esse processo de modernização acontece de forma gradual [10].

Com o aumento da demanda de energia, há a necessidade do aumento de novas fontes de energia e da construção de novas redes de transmissão para a interligação dos sistemas de geração e distribuição, garantindo o suprimento e aumentando a confiabilidade do fornecimento de energia elétrica às cargas [11].

Com essa realidade, criou-se um sistema elétrico baseado em produção de energia centralizada. Recentemente, a inserção de energias renováveis, como solar fotovoltaica e eólicas e, a inserção de veículos elétricos na rede de distribuição está mudando essa realidade, mudando o perfil de geração e consumo.

Em primeiro lugar, é importante enfatizar que, por meio de iniciativas para reduzir o impacto ambiental, os Veículos Elétricos (VEs) se tornam uma escolha sustentável. Com isso, tem-se uma mudança na topologia da rede, sendo necessários estudos para analisar os impactos causados das mudanças da rede elétrica, uma vez que as redes convencionais não foram projetadas para a inserção de VEs [12].

Os VEs inseridos na rede de distribuição podem ser representados como um armazenador de energia que pode ser conectado à rede e fornecer a energia elétrica desejada para o cliente. Além de oferecerem flexibilidade e, se necessário, apoiarem a estabilidade, confiabilidade e

resiliência da rede, existe o desafio da capacidade de recarga à sua implantação generalizada [13]. Portanto, além da infraestrutura de carregamento, exige-se um planejamento que permita o carregamento destes veículos sem comprometer os níveis operativos da rede elétrica.

Com uma infraestrutura de recarga de VEs em uma microrrede instalada, esses podem ajudar a reduzir a pressão sobre a rede, pois eles podem obter energia quando estão carregando e devolver energia quando a demanda é alta, ou seja, são capazes de atuar como cargas (demandando potência) e como geradores (fornecendo potência) [14],[15].

Porém, quando os VEs atuam como cargas, há a adição de novas cargas às cargas sazonais, podendo comprometer a confiabilidade e segurança do sistema elétrico, aumentando sua complexidade, pois pode causar sobrecarga dos transformadores, aumento da demanda nos horários de pico, aumento no nível de desequilíbrio, distorções harmônicas, queda da magnitude de tensão, sobrecarga dos componentes da rede, aumento nas perdas elétricas, entre outras.

O sistema elétrico iniciou fundamentado à uma estrutura hierarquizada em que o fluxo de energia sempre foi unidirecional, de altas tensões para menores tensões. E como as redes de distribuição convencionais não possuíam geração distribuída, estas eram passivas, com fluxo de potência fornecendo energia para o consumidor final. Com a inserção de geração distribuída e fontes renováveis nos sistemas de distribuição, as redes passaram a ser ativas [16].

As redes de distribuição ativas transportam a energia de maneira bidirecional, pois por possuírem geração distribuída, podem gerar mais potência do que a necessária para suprir as cargas do sistema, invertendo então fluxo de potência quando necessário; que pode ser chamado de fluxo reverso [17].

As redes ativas, assim como as redes convencionais, oferecem alguns fatores essenciais para o funcionamento do sistema elétrico de potência, como: distribuição de energia elétrica aos consumidores, controle de frequência, regulação de tensão, entre outros [18].

As microrredes são redes de distribuição ativas, pois incorporam fontes de distribuição renováveis e diferentes cargas no nível de tensão de distribuição. Elas são um grupo de microfuentes adjacentes, combinadas de carga e armazenamento. Sua principal característica é a capacidade de operar conectada com a rede de distribuição e/ou de forma isolada, em que, de forma isolada, opera num modo de emergência e requer a utilização de procedimentos de controle específicos [19].

As variações de geração e de carga são capazes de alterar o ponto de operação do sistema e, conseqüentemente, alteram os níveis de frequência e tensão. Nas microrredes, o sistema fica sujeito a variações por possuírem geradores com pouca inércia, interrupção de geração e desempenho de cargas; o que pode ser um problema quanto à operação em modo ilhado [8].

Com isso, tem-se a necessidade de garantir que a microrrede opere de maneira correta. Sendo assim, serão feitas análises que verifiquem se o sistema elétrico será capaz de suportar a inserção dos VEs na rede, no que se refere aos níveis de tensão, potências ativas e reativas e perdas. Análise das simulações do comportamento do sistema ao usar a energia armazenada nas baterias dos VEs como fonte de potência injetada na rede em caso de necessidade. E ainda, para trabalhar dentro dos padrões de qualidade e atender a demanda de carga quando a microrrede estiver operando de maneira ilhada, analisar se há a necessidade de estratégias de controle.

## **1.2 Revisão da Literatura**

O consumo de energia vem crescendo cada vez mais no sistema e, como consequência disso, é importante a ampliação do sistema elétrico de potência, bem como o aumento da geração e/ou da transmissão.

O fluxo de informações e energia precisam ser bidirecionais entre as concessionárias e os consumidores finais para que a rede se torne uma rede inteligente. Nela, o consumidor deixa de ser apenas consumidor e passa a ser consumidor-produtor, pois é possível que ele tenha acesso à geração distribuída [20].

As microrredes são redes de distribuição que incluem cargas e unidades de geração distribuídas e podem operar de duas maneiras: conectada ao sistema elétrico principal ou de maneira isolada. Porém, quando operam de maneira ilhada, não possuem a mesma segurança do fornecimento de energia de quando conectada ao sistema e, ainda, como o tempo de indisponibilidade do sistema principal não é conhecido, ela possui recursos limitados para atender sua carga [21].

Com a inclusão dos VEs à rede elétrica, quando conectados à rede de distribuição para recargas das baterias, eles são vistos como uma carga puramente ativa, mas se estiverem fornecendo energia ao invés de consumir, eles são considerados geradores de potência ativa [22].

Quando os VEs recarregam, há um acréscimo na demanda convencional de consumo, podendo comprometer a qualidade do fornecimento de energia elétrica. Já quando trabalham como gerador, podem melhorar a condição da microrrede, gerenciando e suprindo suas cargas, permitindo até mesmo trabalhar de maneira ilhada [23]. Por isso, é fundamental estudar seu funcionamento e as estratégias de carregamento das baterias.

Os VEs possuem a capacidade de armazenar energia em suas baterias, porém nem sempre os usuários utilizam a energia total disponível, que pode então ser usada pela rede. Dentro desse conceito, tem-se o “Vehicle to Grid” (V2G), veículo para rede, e o “Grid to Vehicle” (G2V),

rede para veículo; em que no primeiro, os veículos podem fornecer energia tanto para a rede elétrica quanto para a residência. No segundo caso, faz apenas o processo de carregamento [24].

Em [25], no estudo da inserção dos veículos elétricos na rede de distribuição, analisando o fluxo de carga, os veículos elétricos atuam como uma carga conectada ao sistema, e essas cargas são relacionadas ao impacto que causam na tensão (ao ponto em que estão conectadas).

Essas cargas podem ser definidas pelo modelo ZIP, ou seja, podem possuir parcelas de impedância, corrente ou potência constantes. Nas cargas com corrente constante, o módulo da corrente não varia com a tensão; nas com impedância constante, é representada por uma impedância conectada na barra, produzindo variação da potência proporcional ao quadrado da tensão; nas com potência constante, não variam sua potência com as mudanças de tensão na barra [26].

Embora a microrrede possa operar tanto de maneira conectada quanto ilhada, alguns padrões e ações de controle são necessários nessa transição. Existe uma hierarquia de controle em microrredes em diferentes níveis que visam o aumento da confiabilidade do sistema por meio de um controle local e independente, que são divididas em três níveis: controle primário, controle secundário e controle terciário. Esses controles são capazes de regular a frequência e a tensão para os dois modos de operação e controlar o fluxo de potência [27].

O controle primário trata dos problemas de regulação de tensão para estabilidade do sistema e do partilhamento de carga. O modo operativo dos conversores está diretamente relacionado a ele. Nesse nível, utiliza-se o método *droop*, que é uma resposta natural da frequência e tensão do sistema visto que há variações de potência [28].

O controle secundário faz a resincronização com a rede, regulando os níveis de tensão e frequência do sistema quando a microrrede atua de forma isolada da rede elétrica, removendo os desvios causados na rede e fazendo com que trabalhe com níveis adequados. Ele atua na compensação dos desvios causados no controle primário [29].

As microrredes possuem algumas peculiaridades quando trabalhadas em algoritmos de fluxo de potência, como a ausência de uma barra *swing*, interrupções de geração e carga e variação da frequência [30],[31]. Uma metodologia fundamentada do algoritmo de Newton-Raphson apresenta a tensão e a frequência da barra *swing* como variáveis de estado do problema [30]. Uma característica pertinente do sistema de distribuição é a baixa razão X/R, que pode causar problemas de convergência, e para tentar resolver esse problema, utiliza-se os métodos de rotação de eixos ou de Levenberg-Marquadt [32],[33].

Rotação de eixos é um método que modifica matematicamente as características das linhas de distribuição de tal maneira que melhore a convergência do método de Newton-

Raphson, sem que modifique seus estados [32]. E, o método de Levenberg-Marquadt, quando a matriz Jacobiana possui características de esparsidade, melhora a solução do método de Newton-Raphson [33].

Para sistemas desequilibrados, utiliza-se também o algoritmo de varredura para fluxo de potência, modelando inversores para microrredes trabalhando tanto conectadas quanto ilhadas [34]. Porém, sua utilização impossibilita o acesso à matriz Jacobiana do sistema, sendo necessária uma análise de como os modos operativos dos conversores de potência afetam o fluxo de potência [35].

Existe uma hierarquia de corte de carga em relação a níveis de tensão e frequência em microrredes ilhadas. Essa hierarquia independe do cenário operativo do sistema e possui três níveis de prioridade: alto, médio e baixo. Ela diz respeito à sobrevivência do sistema, por isso, se necessário, aplica-se um eventual cenário de corte de carga [36].

Em [37], para não prejudicar o fornecimento de energia do sistema, utiliza-se um processo iterativo, chamado de controle preditivo, que evita a conexão de cargas críticas, analisando o histórico de consumo do sistema e mantendo o equilíbrio de geração e carga.

Dentro dessas condições, a principal proposta do trabalho consiste em aliar o controle secundário à suportabilidade do sistema, com os veículos elétricos podendo atuar como armazenadores de energia durante um cenário de ilhamento, prevenindo a oscilação da geração e da carga. No entanto, eles ainda representam uma lacuna na literatura atual, pois o controle secundário é frequentemente visto como uma medida de reconexão à rede principal em um único ponto de operação; assim como o corte de carga, que se preocupa principalmente com aspectos de estabilidade do sistema.

A principal contribuição deste trabalho é a possibilidade da utilização da energia armazenada nas baterias dos veículos elétricos como fonte de potência injetada na rede em caso de necessidade quando ocorrer situações de ilhamento nas microrredes e se necessário, a utilização da atuação do controle primário de frequência e tensão para a correção da operação do sistema, podendo emular seu comportamento e contribuir no suprimento de energia elétrica.

### **1.3 Justificativa**

Algumas das motivações desse trabalho são:

- I. Futuramente, as microrredes podem se tornar independentes do agente operador do sistema principal, ou seja, operarem de forma ilhada;
- II. A motivação do consumidor em aderir à Geração Distribuída vem crescendo cada vez mais, principalmente por causa da escassez dos recursos fósseis;

- III. Ainda não existem restrições na operabilidade e capacidade de recursos quando a microrrede opera de modo ilhado;
- IV. Ainda não é uma realidade, mas o número de veículos elétricos aumentará com o decorrer dos anos, e se isso acontecer, a rede de distribuição deve suprir essa nova carga atípica nos sistemas de potência;
- V. Por fim, é necessário um estudo dos veículos elétricos atuando como armazenadores de energia.

## **1.4 Objetivos**

### **1.4.1 Objetivos Gerais**

A presente pesquisa pretende avaliar as condições de inserção de veículos elétricos em uma rede de distribuição teste. Deseja-se estabelecer critérios para o carregamento dos veículos elétricos para a nova demanda de energia devido ao carregamento das baterias desses veículos, e se há a necessidade de um esquema de recarga controlada. Na microrrede em condição operativa de ilhamento, utilizar as baterias dos veículos como armazenadores de energia e fornecer energia dentro dos limites estabelecidos. Assim, espera-se validar através desse trabalho as ferramentas propostas.

### **1.4.2 Objetivos Específicos**

São objetivos específicos deste trabalho:

- I. Apresentar a atuação dos VE's nas microrredes;
- II. Analisar o comportamento das cargas do sistema com a inserção dos VE's;
- III. Analisar se será necessário a utilização das baterias dos veículos elétricos no momento de ilhamento;
- IV. Analisar a influência de VEs em relação a tensão e frequência da rede;
- V. Utilizar estratégia de controle secundário para manter a operação do sistema;
- VI. Servir como base para trabalhos futuros.

## **1.5 Estrutura do Trabalho**

O **Capítulo 1** apresentou uma introdução ao tema, destacando a contextualização dele, bem como sua revisão bibliográfica.

O **Capítulo 2** traz os principais conceitos relacionados às microrredes.

O **Capítulo 3** apresenta os conceitos a respeito dos veículos elétricos e rede de distribuição, as baterias utilizadas, formas de recarga e os impactos e benefícios de sua inserção na rede de distribuição.

O **Capítulo 4** apresenta uma introdução à fluxo de potência em microrredes.

O **Capítulo 5** descreve detalhadamente de que forma os veículos elétricos serão tratados neste trabalho e qual a inovação ao fazê-lo.

O **Capítulo 6** mostra o sistema teste implementado e sua eficácia e validação. São feitas duas análises, a primeira consiste no estudo do comportamento das cargas com o carregamento dos veículos elétricos em alguns cenários distintos; a segunda assume a necessidade de os veículos poderem funcionar como geradores em casos de ilhamento. E foi feito um estudo do nível de tensão do sistema e do cálculo do fluxo de potência para verificar se o sistema é factível operacionalmente.

Por fim, o **Capítulo 7** apresenta as considerações finais do trabalho desenvolvido.

## 2. COMPONENTES

Este capítulo apresenta uma breve fundamentação teórica a respeito dos componentes presentes em microrredes. Todas as formulações e simplificações utilizadas nesse capítulo foram tiradas da referência [8].

### 2.1 Geradores

#### 2.1.1 Painel Fotovoltaico

A corrente  $I_{PV}$  fornecida pelo painel é dada através da Primeira Lei de Kirchhoff:

$$I_{PV} = I_{ph} - I_D - I_{sh} = I_{ph} - I_o e^{\frac{q(V_{PV} + R_s I_{PV})}{AK_B T}} - \frac{V_{PV} + R_s I_{PV}}{R_{sh}} \quad (1)$$

Onde:

$I_{PV}$ : corrente fornecida à carga (A);

$I_{ph}$ : corrente gerada a partir do efeito fotoelétrico (A);

$I_D$ : corrente do diodo (A);

$I_o$ : corrente de saturação reversa do diodo (A);

$R_s$ : resistência série da célula ( $\Omega$ );

$R_{sh}$ : resistência shunt da célula ( $\Omega$ );

$V_{PV}$ : tensão da carga (V);

$A$ : fator de qualidade da junção p-n (1~2);

$K_B$ : constante de Boltzmann ( $1,38e^{-23} \frac{J}{K}$ )

$T$ : temperatura da junção (K);

$q$ : carga do elétron ( $1,602e^{-19} C$ )

As Tabelas 1 e 2 mostram os parâmetros de um módulo fornecidos pelo fabricante e os parâmetros que foram calculados, para valores de irradiação de  $1000 W/m^2$  e temperatura ambiente de  $25^\circ C$ , tirados da referência [8], respectivamente.

Tabela 1- Parâmetros fornecidos pelo fabricante.

Parâmetro	Valor
Máxima Potência ( $P_{m\acute{a}x}$ )	120 W
Tensão em $P_{m\acute{a}x}$ ( $V_{mp}$ )	33.7 V
Corrente em $P_{m\acute{a}x}$ ( $I_{mp}$ )	3.56 A
Corrente de curto-circuito ( $I_{sc}$ )	3.87 A

Tensão de Circuito Aberto ( $V_{op}$ )	42.1 V
Coeficiente de temperatura de $I_{sc}$	(0.065±0;015)%/°C
Coeficiente de temperatura de $V_{oc}$	-(160±10) mV/ °C

Tabela 2- Parâmetros calculados.

Parâmetro	Valor
$I_{ph}$	3.871 A
$I_o$	$7,9672e^{-7}$ A
$R_s$	0.3996 $\Omega$
$R_{sh}$	1500,8 $\Omega$
A	1.4776

### 2.1.2 Turbina Eólica

As turbinas eólicas transformam a energia cinética do vento em energia elétrica. A fundamentação matemática foi abordada na referência [8] e a seguir tem-se as condições da potência fornecida pela turbina em relação à velocidade do vento.

$$P_{wt}(v) = \begin{cases} 0 & \text{para } 0 \leq v \leq v_{ci} \\ (A + Bv + Cv^2) \cdot P_{wt}^n & \text{para } v_{ci} < v < v_r \\ P_{nominal} & \text{para } v_r < v \leq v_{co} \\ 0 & \text{para } v > v_{co} \end{cases} \quad (2)$$

Onde:

$v$ : velocidade do vento;

$P_{wt}^n$ : potência nominal da turbina;

$v_r$ : velocidade nominal;

$v_{ci}$ : velocidade de *cut in* (mínimo valor para que a turbina inicie o movimento);

$v_{co}$ : velocidade de *cut off* (velocidade a partir da qual a potência gerada é zero);

A, B e C: coeficientes do comportamento parabólico da turbina.

Em que:

$$A = \frac{1}{(v_{ci} - v_r)^2} \cdot (v_{ci}(v_{ci} + v_r) - 4v_{ci}v_r \cdot (\frac{v_{ci} + v_r}{2v_r})^3) \quad (3)$$

$$B = \frac{1}{(v_{ci} - v_r)^2} (4(v_{ci} + v_r) \cdot (\frac{v_{ci} + v_r}{2v_r})^3 - 3(v_{ci} + v_r)) \quad (4)$$

$$C = \frac{1}{(v_{ci} - v_r)^2} \cdot (2 - 4 \cdot \frac{v_{ci} + v_r}{2v_r})^3 \quad (5)$$

Os parâmetros utilizados são para uma turbina eólica fictícia [8]. São eles:

$$P_{wt}^n = 50kva$$

$$v_{ci} = 4m/s$$

$$v_r = 13m/s$$

$$v_{co} = 20 m/s$$

### 2.1.3 Baterias

Em fluxo de potência, quando as baterias estão descarregando, são modelados como injeção de potência (comportando como geradores); quando estão sendo descarregados, como cargas. Geralmente, são utilizados: baterias, supercapacitores, veículos elétricos etc.

Uma quantidade de VEs conectados à rede elétrica pode devolver energia a essa rede em casos de necessidade, funcionando como uma bateria de distribuição gigante. Sendo útil para complementar a geração de energia solar e eólica, favorecendo o funcionamento do sistema e ajudando no equilíbrio da rede em momentos de alta demanda.

### 2.1.4 Cargas

Em sistemas de distribuição, para uma carga estática, a potência consumida está diretamente ligada à frequência do sistema e a tensão terminal da barra [38], conforme descrito abaixo.

$$Q_{Load}(V, \omega) = Q_{Load_o} \left( \frac{V}{V_o} \right)^\beta (1 + K_{qf}(\omega - \omega_o)) \quad (6)$$

Onde:

$P_{Load}(V, \omega)$ : potência ativa;

$Q_{Load}(V, \omega)$ : potência reativa;

$P_{Load_o}(V, \omega)$ : valor nominal de potência ativa;

$Q_{Load_o}(V, \omega)$ : valor nominal de potência reativa;

$V_o$ : tensão nominal;

$\omega_o$ : frequência nominal;

$\alpha$ : coeficiente que relaciona a variação de potência ativa em relação a tensão;

$\beta$ : coeficiente que relaciona a variação de potência reativa em relação a tensão;

$K_{pf}$ : coeficiente que relaciona a variação de potência ativa em relação a frequência;

$K_{qf}$ : coeficiente que relaciona a variação de potência reativa em relação a frequência.

A Tabela 3 mostra a classificação dos consumidores de acordo com a necessidade do serviço [39].

Tabela 3- Classificação dos consumidores.

Nível de Prioridade	Tipo de Consumidores
Alto	Hospitais Serviços de Telecomunicações Transporte Público Iluminação Pública
Médio	Comercial e Industrial
Baixo	Residencial e Rural

## 2.2 Conversores Eletrônicos de Potência (PEC)

O controle da injeção de potência ativa e reativa e o controle de tensão e frequência são definidos pelo modo de operação do PEC, que tem a função de dar qualidade e confiabilidade ao sistema. São quatro os modos de operação dos conversores eletrônicos e serão definidos nos próximos tópicos.

### 2.2.1 Modo VSI (Voltage Source Inverter)

Esses conversores operam somente em condições de ilhamento e controlam a tensão e a frequência no ponto de conexão, operando como uma fonte de tensão. Para esse comportamento, utiliza-se o método *droop* [11], [38], [40]. É possível também, um conversor em VSI absorver ou fornecer potência reativa do sistema [38].

O método *droop* aceita que o PEC controle a frequência de acordo com a demanda de potência ativa e a tensão de acordo com a demanda de potência reativa. Ele opera da maneira mostrada a seguir.

$$\omega = \omega_{Ref} - m_k P_{gk} \quad (7)$$

$$V_k = V_{kRef} - n_k Q_{gk} \quad (8)$$

Onde:

$\omega$ : frequência nominal do sistema;

$V_k$ : tensão terminal na barra k;

$\omega_{Ref}$ : valores de referência para a frequência;

$V_{kRef}$ : valores de referência para a tensão;

$P_{gk}$ : potência ativa gerada na barra k;

$Q_{gk}$ : potência reativa gerada na barra k;

$m_k$ : coeficiente linear de droop ativo;

$n_k$ : coeficiente linear de droop reativo.

### 2.2.2 Modo PQ

No modo PQ o PEC fornece valores fixos de potência ativa e potência reativa e é comumente usado em gerações renováveis e em VEs pois tem a capacidade de extrair a potência máxima disponível [40].

Nesse caso, o PEC é colocado como carga negativa, trabalhando como uma fonte de corrente controlável com um fator de potência fixo, ou seja, não há manutenção da tensão e/ou frequência já que a injeção de valores fixos de potência prevalece.

### 2.2.3 Modo Volt-Var

Nesse modo de operação, do mesmo modo que foi mostrado na resposta do controle do droop, o inversor pode injetar ou absorver potência reativa de acordo com uma função linear. A potência reativa fornecida é em função da tensão terminal e a potência ativa é mantida constante através de um set-point [41].

### 2.2.4 Modo PV

Nesse modo, independente do cenário operativo, a potência ativa e a tensão do terminal são mantidas especificadas e a potência reativa gerada é em função da demanda do sistema visando a tensão constante no PCC. Sendo assim, o modelo de um conversor PV é dado por:

$$P_{gk} = P_{espec_k} \text{ e } V_k = V_{espec_k}.$$

Uma das vantagens é que os inversores podem trabalhar juntos em uma microrrede independente do modo de operação, isso faz com que haja fornecimento de energia com qualidade e aumente a flexibilidade do sistema entre as operações conectadas e ilhadas.

Todos os PECs citados acima possuem capacidade de geração definida que faz comutação para o modo PQ se houver casos de violação de capacidade.

## 2.3 Controles

### 2.3.1 Controle Primário

Como falado anteriormente, o controle primário é dado pela resposta de *droop* do conversor em modo VSI. Sua função é reproduzir o comportamento da geração conectada ao sistema de transmissão, variando a frequência e a tensão em função da variação da carga. A demanda ativa de energia é inversamente proporcional à frequência do sistema, como é mostrado abaixo. Da mesma maneira, a saída de tensão é controlada pela potência reativa, na proporção do coeficiente  $n$  [40].

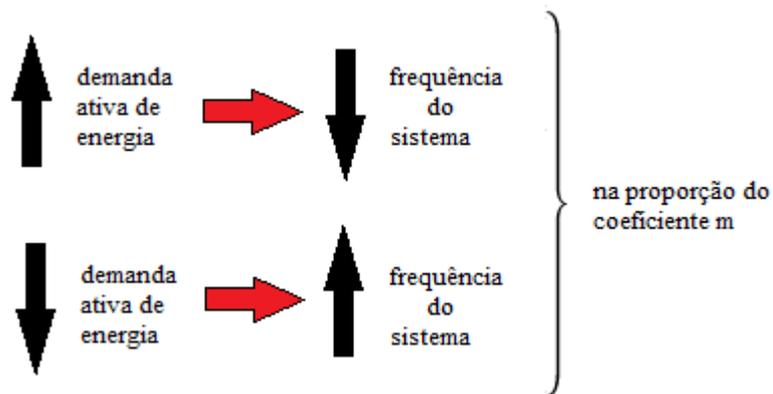


Figura 4 – Comportamento da demanda da energia em relação à frequência.

As fontes despacháveis operam com base em suas medições terminais para o cálculo da injeção de energias ativa e reativa através do método *droop* nesse controle.

### 2.3.2 Controle Secundário

O controle secundário atua para manter a sobrevivência do sistema quando estiver em um cenário de ilhamento. Ele restaura o ponto operativo do sistema quando excede os limites estabelecidos por lei. Para a correção do erro entre o ponto de operação e a referência desejada, usa-se controladores [41].

Seu funcionamento é igual a um movimento vertical do ponto de operação mostrado na resposta do *droop*, enquanto a potência é mantida constante de acordo com a demanda, a frequência se altera.

## **2.4 Considerações Finais**

Os próximos capítulos são destinados aos conceitos da inserção dos veículos elétricos na rede de distribuição, bem como as baterias utilizadas, formas de recarga, impactos e benefícios de sua inserção na rede de distribuição.

### 3. VEÍCULOS ELÉTRICOS EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO

---

A Resolução Normativa Nº 428, da ANEEL, em 17 de abril de 2012, dispôs as condições gerais para a entrada de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, abrindo espaço para a inserção de Veículos Elétricos na rede de distribuição. Após isso, através da Consulta 002/2016 da ANEEL, em 2016, aspectos regulatórios referentes à conexão de veículos elétricos às redes de distribuição e a necessidade de regulamentação dos aspectos relativos ao fornecimento de energia a VEs foram analisados [42]. Em 19 de junho de 2018, a ANEEL com a Resolução Normativa Nº 819 aprovou a primeira regulamentação sobre a recarga de veículos elétricos por interessados na prestação desse serviço (distribuidoras, postos de combustíveis, entre outros) [43].

A maior característica dos veículos elétricos é que sua fonte de energia para acionar os motores elétricos são suas baterias, ou seja, a eletricidade é seu combustível, podendo ser obtida de várias maneiras: por meio de plugs ou cabos aéreos são conectados diretamente à fonte externa de eletricidade; por meio de sistemas de indução eletromagnética ou por meio da energia mecânica de frenagem regenerativa, ou seja, ao se frear o veículo. Em seguida, essa eletricidade é armazenada em baterias que alimentam o motor elétrico.

Os veículos elétricos podem ser divididos em dois grupos: Veículos Elétricos *Plug-in* (VEP) ou Veículos Elétricos a bateria (VEB), os quais necessitam se conectar à rede para recarregar; e Veículos Elétricos Híbridos (VEH), que podem ou não ser *Plug-in*, que são constituídos por motores a combustão e eletricidade (não necessitam de conexão à rede para recarregar suas baterias). Abaixo estão algumas especificações de cada um deles.

- Veículos elétricos à bateria ou *plug-in* (VEB): movidos exclusivamente por motores elétricos, reduzindo a emissão de gases poluentes. As baterias são suas fontes de energia, podendo ser carregadas conectando à rede de energia ou com a substituição por outra bateria carregada;
- Veículos elétricos híbridos (VEH): possuem uma combinação de motores elétricos e motores de combustão interna, o que causa ao veículo uma grande autonomia. Porém, não é possível fazer o carregamento das baterias através da rede de energia, ela é feita com a ajuda de frenagem regenerativa e pelo motor a combustão;
- Veículos elétricos híbridos *plug-in* (VEHP): possuem motores elétricos e motores a combustão interna. Suas fontes de energia são: baterias, supercapacitores e combustíveis fósseis ou alternativos. São carregados conectando a rede de energia ou pela frenagem regenerativa.

A Tabela 4 mostra a autonomia de cada um deles.

Tabela 4- Autonomia dos Veículos Elétricos [44].

<b>Tipo</b>	<b>Autonomia</b>
VEB	100 a 400 km - Bateria
VEH	400 a 700 km - Combustível
VEHP	30 a 120 km – Bateria 400 a 700 km - Combustível

Alguns tipos de conexões são encontrados nos sistemas de distribuição de energia, como: monofásicas, bifásicas e trifásicas. Essas conexões distintas são as mais encontradas na baixa tensão, devido a grande quantidade de cargas residenciais. Os níveis de cargas comumente encontrados são as cargas rurais, residenciais, comerciais, industriais, serviço público e iluminação pública. Cada uma delas possui um tipo de fator de potência e um perfil de tensão.

No cenário deste trabalho, os veículos elétricos poderão ser conectados às instalações elétricas residenciais, na rede de baixa tensão, compartilhando o ponto de conexão dos demais equipamentos da rede. Quando os VEs estão operando como cargas, como se trata de um carregamento de bateria, ele possui um conversor CA/CC que adequa os níveis de tensão e corrente para que a bateria carregue de maneira eficiente, partilhando o mesmo ponto de conexão das demais cargas da residência por meio do ponto de conexão comum (PCC) do quadro elétrico [45]. A Figura 5 mostra como um usuário pode se conectar a uma rede de distribuição.

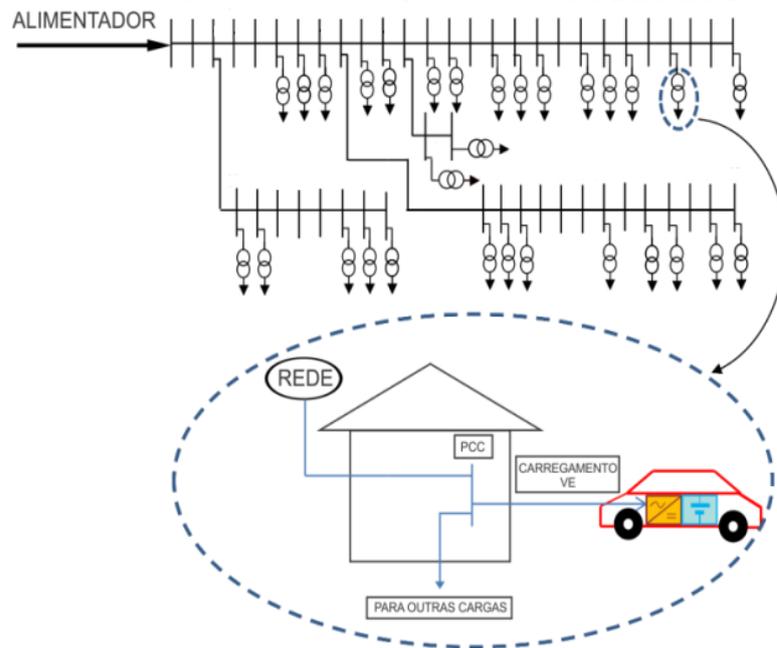


Figura 5- Modelo de um sistema de Distribuição com Veículos Elétricos Plugáveis [46].  
Adaptado/Modificado

### 3.1 Baterias

As baterias podem ser divididas em dois grupos: baterias primárias e baterias secundárias. No primeiro, são aquelas que não podem ser carregadas, ou seja, o processo químico de geração de energia é irreversível, como as pilhas comuns e as pilhas alcalinas. Já no segundo, são as baterias que podem ser recarregadas em um determinado número de ciclos, como as baterias de automóveis, computadores portáteis e de telefones celulares [47].

A função da bateria é de armazenagem de energia e ela é um componente central nos veículos elétricos. Elas podem ser dispostas em módulos (mais de uma célula de bateria) ou em packs (mais de um módulo). Existem alguns parâmetros para a escolha de uma bateria veicular, como: a vida útil (ciclos de carga e descarga), a capacidade de energia que ela pode armazenar, o desempenho, a potência e o custo. Há vários tipos em desenvolvimento, porém aqui serão mostradas as principais encontradas nos veículos elétricos atuais, como mostra o diagrama esquemático da Figura 6 [48].

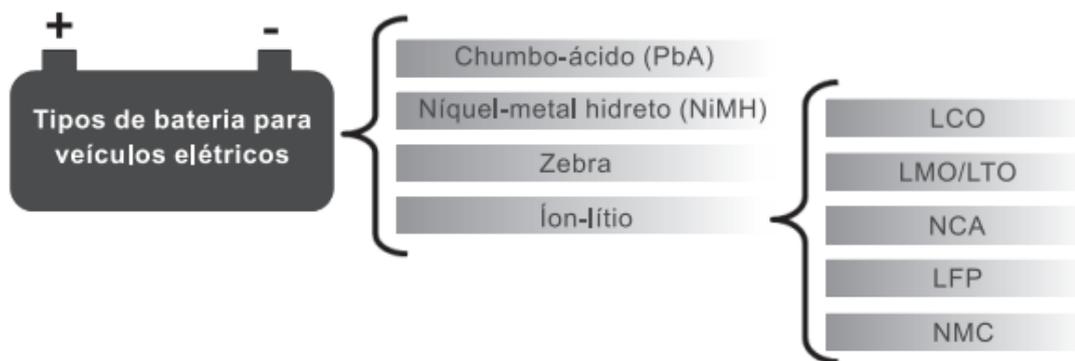


Figura 6- Diagrama dos tipos de baterias para veículos elétricos.

Outro fator importante na escolha de uma bateria para veículos elétricos é sua durabilidade. Como as baterias são sua única fonte de energia primária, são necessárias muitas recargas ao longo do tempo de uso do veículo. Ou seja, a bateria deve suportar um alto número de ciclos de recarga sem perder sua eficiência e qualidade [49]. Os próximos tópicos mostrarão algumas características de cada uma das baterias do diagrama.

### 3.1.1 Bateria Chumbo-ácido (PbA)

Essa bateria é constituída de dois eletrodos; um de dióxido de chumbo em pó e um de chumbo esponjoso, que são mergulhados em uma solução de ácido sulfúrico dentro de uma liga de chumbo. Fechando o circuito interno e conectando eletricamente os terminais, a bateria entra em funcionamento (descarga). É uma associação de pilhas ligadas em série. A tensão elétrica de cada pilha é de aproximadamente 2 volts. A mais comum nos carros modernos, uma bateria de pilhas, fornece uma tensão elétrica de 12V [50].

Sua vida útil é de aproximadamente três anos e podemos citar algumas de suas vantagens, como: custo relativamente baixo; facilidade de obtenção de matérias primas (chumbo, enxofre); facilidade de fabricação e possuir características eletroquímicas favoráveis ao armazenamento de energia [51]. Por ser uma das tecnologias mais antigas e mais difundida, a partir da tecnologia dessa bateria, têm-se alternativas que utilizam esse mesmo conceito, que são: bateria chumbo-ácido tradicional, bateria VRLA (*Valve- Regulated Lead-Acid*), baterias AGM (*Adsorbed Glass Mat*) e baterias de gel.

### **3.1.2 Níquel-Metal-Hidreto (NiMH)**

Essas baterias constituem a tecnologia dominante para os veículos elétricos em fabricação atualmente. A vida útil dessa bateria pode ser de até 3000 ciclos, onde o ciclo representa uma carga e descarga completa da bateria.

As baterias de NiMH devem ser carregadas de modo rápido, pois ao carregar de modo lento, encurtam seu tempo de vida. Algumas de suas vantagens são: armazenamento e transporte simples (não sujeito a controle regulamentar), possui materiais pouco tóxicos, menor “efeito de memória”, maior capacidade da bateria. Já suas principais desvantagens são: vida útil limitada, não tolera sobrecarga, elevada autodescarga, gera calor durante a carga rápida (que reduz o rendimento) [52].

### **3.1.3 Zebra (Sódio-Metal-Cloreto)**

As baterias de sódio, “zebra” ou “sal fundido” possuem como limitação a necessidade de aquecimento para cerca de 270° C para seu funcionamento, o que faz consumir bastante energia. Sua principal vantagem é não possuir materiais tóxicos [48].

Esse tipo de bateria é bastante utilizado em aplicações de veículos de tração puramente elétrico de alta taxa de utilização, como veículos de frota de empresas. Mesmo contendo um processo de fabricação complexo, apresenta alta reciclabilidade e é muito segura mesmo com o inconveniente da alta temperatura [47].

### **3.1.4 Íon-Lítio**

São formadas por um catodo e um anodo. O catodo é o maior determinante de energia, da vida útil e do custo da bateria. Essas baterias são utilizadas em larga escala e apresentam grandes vantagens, como: quanto a sua densidade de energia, não possuem efeito de memória (vício da bateria), não é preciso esperar descarregar totalmente para seu carregamento, maior capacidade por volume, maior eficiência e menor custo do metal. Constituem a elas também alguns desafios, como: a segurança, o desempenho em altas temperaturas, durabilidade e seu custo total [48], [53].

Algumas das baterias de íon-lítio são as seguintes: LCO (óxido de lítio-cobalto), NCA (lítio-níquel-cobalto-alumínio), NMC (lítio-níquel-manganês-cobalto), LMO/LTO (lítio manganês spinel) e LFP (fosfato de ferro-lítio) [54].

A Figura 7 apresenta as energias e potências específicas para os diferentes tipos de baterias, e a Tabela 5 mostra a capacidade das baterias em relação aos tipos de veículos elétricos.

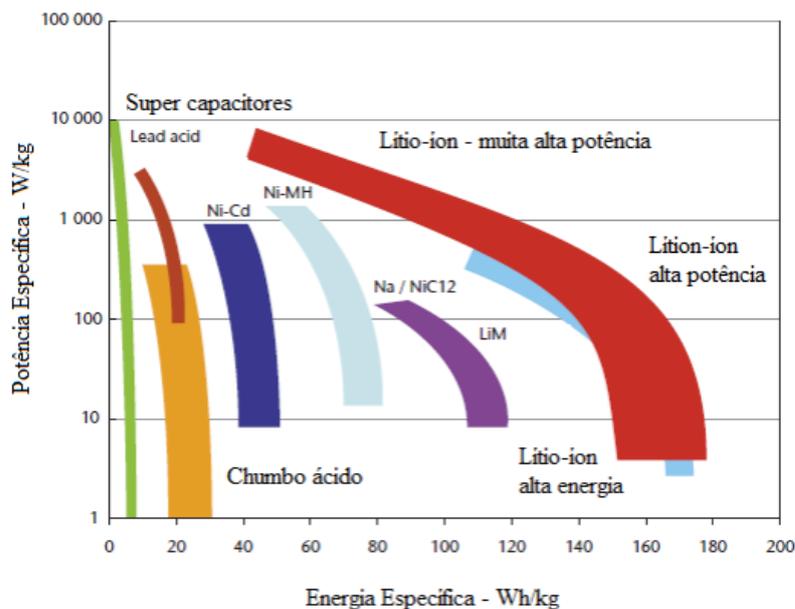


Figura 7- Energia e potência específicas para os diferentes tipos de baterias [55].

Tabela 5- Capacidade das baterias em relação aos tipos de veículos elétricos [44].

Tipo	Capacidade das Baterias
VEB	20 a 100 kWh
VEH	1 a 2 kWh
VEHP	a 20 kWh

### 3.2 Benefícios dos Veículos elétricos

Os veículos elétricos podem impactar positivamente ao meio ambiente, a economia e a operação do sistema elétrico. O principal benefício da sua utilização é em questões ambientais, pois a redução da emissão de gases poluentes gerados na combustão dos combustíveis fósseis é um fato crucial para a popularização dos veículos elétricos. Também podem ser usados para ajudar a rede de distribuição com serviços auxiliares, onde é necessário que os veículos sejam agrupados em estacionamentos inteligentes (conhecidos como agregadores); e como foco desta dissertação, com isso podem fornecer energia para a rede, ajudando com a regulamentação de tensão e controle de frequência. Caso haja a recarga coordenada, os veículos podem ajudar o sistema recarregando as baterias no período noturno, consumindo excedente de geração [56],[57].

### 3.3 Agregadores

Além de contribuir para a segurança energética e poluição local, os veículos elétricos são uma solução complementar para a questão da intermitência da geração de fontes não despacháveis eólicas e solares, por possuir capacidade de armazenar energia em suas baterias.

Definido em [58], os agregadores são os locais de gerenciamento de recarga dos veículos elétricos, onde os objetivos principais da empresa proprietária do agregador são: menor custo de recarga para os usuários, garantir a qualidade de energia para recarga dos veículos, e gerenciamento da recarga (de um jeito que não sobrecarregue a rede).

Em relação à recarga dos veículos elétricos, há dois conceitos importantes: V2G (*vehicle-to-grid*), em português, veículo-para-rede, onde os veículos podem auxiliar a rede em momentos críticos, injetando energia para regular os níveis de frequência e tensão; G2V (*grid-to-vehicle*), rede-para-veículo, onde os veículos são apenas cargas para o sistema, consumindo energia [57]. Este trabalho considera os dois conceitos.

Geralmente, esses estacionamentos inteligentes estão localizados em diversos lugares, como universidades, áreas comerciais e industriais e condomínios. Portanto, o carregamento dos veículos pode acontecer em horário comercial (entre 8 até 12 horas e 14 até 18 horas) e/ou durante a madrugada (entre 00 até 7 horas), para tentar acabar com o problema da recarga nos horários de pico.

### 3.4 Considerações Finais

Após o presente capítulo, é possível classificar os diferentes tipos de veículos elétricos, conforme suas características de funcionamento, modo de recarga e autonomia de cada um deles. Foi demonstrado também uma possível conexão de um veículo elétrico com o sistema de distribuição.

As baterias citadas possuem características específicas, bem como a durabilidade, o armazenamento e o custo. Deste modo, tem-se as energias e potências específicas para cada tipo de bateria.

São mostrados os principais benefícios da popularização dos veículos elétricos no sistema de distribuição, dando destaque a sua contribuição ao meio ambiente, havendo diminuição da emissão de gases poluentes.

Por fim, tem-se como as recargas das baterias nos veículos são feitas nos agregadores.

Os próximos capítulos são destinados à formulação do problema e da ferramenta utilizada nesta dissertação.

## 4. FLUXO DE POTÊNCIA

A fundamentação matemática que compõe o algoritmo do fluxo de potência em microrredes ilhadas é apresentada neste capítulo.

### 4.1 Método de Newton-Raphson

Os algoritmos de fluxo de potência tradicionais podem ser usados para o cálculo de fluxo de carga em microrredes que operam em modo conectado. Neste caso, além dos cuidados em relação às redes convencionais, pode-se obter para essas redes, o fluxo reverso de potência devido à geração distribuída local. Já em modo ilhado, a formulação convencional de fluxo de carga não é válida devido algumas limitações, como: não ter uma barra swing quando ilhada; os geradores distribuídos poderem apresentar capacidade limitada, entre outros.

Devido a isso, a referência [30] criou uma metodologia usando o método de Newton-Raphson modificado (MNRM) para resolver o fluxo de potência em microrredes operando neste modo. Essa metodologia combina o controle primário dos geradores com o MNR tradicional. Nesta dissertação, ela será utilizada e complementada.

### 4.2 Simplificações

No caso das baterias e dos veículos elétricos, quando utilizados como geradores, são considerados como “cargas negativas”, ou seja, modelados como uma injeção de geração na barra, subtraído das cargas ali conectadas.

A potência líquida da barra é assumida por:

$$P_k = P_{load_k} - P_{GD_k} \pm P_{Bat_k} \pm P_{BatVE_k} \quad (9)$$

$$Q_k = Q_{load_k} - Q_{GD_k} \pm Q_{Bat_k} \pm Q_{BatVE_k} \quad (10)$$

Onde:

$P_k$ : Valor líquido de potência ativa;

$Q_k$ : Valor líquido de potência reativa

$P_{load_k}$ : Potência ativa consumida pela carga;

$Q_{load_k}$ : Potência reativa consumida pela carga;

$P_{GD_k}$ : Geração ativa do gerador não despachável conectado à barra;

$Q_{GD_k}$ : Geração reativa do gerador não despachável conectado à barra;

$P_{Bat_k}$ : Potência ativa fornecida pelo banco de baterias;

$Q_{Bat_k}$ : Potência reativa fornecida pelo banco de baterias;

$P_{BatVE_k}$ : Potência ativa fornecida pela bateria do veículo elétrico;

$Q_{BatVE_k}$ : Potência reativa fornecida pela bateria do veículo elétrico.

A potência fornecida pelo banco de baterias e pelas baterias dos veículos elétricos podem variar de acordo com o estado do sistema, carregando quando há excesso de geração e descarregando quando há falta de geração, respeitando os limites de capacidade. Ou seja, para valores negativos de  $P_{Bat_k}$  e  $P_{BatVE_k}$  a bateria será descarregada comportando-se como gerador; para valores positivos, comportam-se como cargas.

### 4.3 Equações algébricas

No caso de microrredes ilhadas, pode haver um pequeno desvio da frequência em relação ao seu valor de referência. Neste trabalho, na formulação do fluxo de potência, a frequência do sistema e a tensão da barra de referência são consideradas variáveis desconhecidas, assumindo-as como variáveis de estado [30]. O modelo aqui utilizado é mostrado a seguir.

$$f(x) = 0; x = \begin{bmatrix} \delta \\ \mathbf{V} \\ V_1 \\ \omega \end{bmatrix}; f = \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{P} \\ \Delta \mathbf{Q} \\ \Delta Q_{sys} \\ \Delta P_{sys} \end{bmatrix} \quad (11)$$

Onde:

$f$ : é o sistema de equações de *mismatches*;

$x$ : é o conjunto de variáveis de estados;

$\delta$ : é o conjunto de ângulos de todas as barras com respeito a de referência;

$\mathbf{V}$ : é o conjunto de magnitudes de tensão de todas as barras do sistema;

$V_1$ : é a magnitude de tensão da barra de referência angular do sistema;

$\omega$ : é a frequência angular do sistema;

$\Delta \mathbf{P}$ : é o conjunto de *mismatches* das potências ativas de todas as barras;

$\Delta \mathbf{Q}$ : é o conjunto de *mismatches* das potências reativas de todas as barras;

$\Delta Q_{sys}$ : são as *mismatches* das potências ativas do sistema;

$\Delta P_{sys}$ : são as *mismatches* das potências reativas do sistema;

Conforme mostrado na referência [8], são dadas as equações para as mismatches de potência em cada barra, as equações para as mismatches de potência do sistema e as equações das perdas nas linhas, conforme mostrado a seguir.

- **Mismatches de potência em cada barra**

$$\Delta P_k = (P_{gk} - P_{load_k}) - P_{calc_k}; k = (1,2,3 \dots nb) \quad (12)$$

$$\Delta Q_k = (Q_{gk} - Q_{load_k}) - Q_{calc_k}; k = (1,2,3 \dots nb) \quad (13)$$

Em que:

$$P_{gk} = \frac{\omega_{ref} - \omega}{m_k} \quad (14)$$

$$Q_{gk} = \frac{V_{ref}^k - V^k}{n_k} \quad (15)$$

E que:

$$P_{calc_k} = |V_k| \sum_{n=1}^{nb} |Y_{kn}^+| |V_n| \cos(\delta_k - \delta_n - \theta_{kn}^+) \quad (16)$$

$$Q_{calc_k} = |V_k| \sum_{n=1}^{ng} |Y_{kn}^+| |V_n| \sin(\delta_k - \delta_n - \theta_{kn}^+) \quad (17)$$

Onde:

$\Delta P_k$ : mismatches de potência ativa da barra k;

$\Delta Q_k$ : mismatches de potência reativa da barra k;

$P_{gk}$ : potência gerada pelos geradores despacháveis ativa;

$Q_{gk}$ : potência gerada pelos geradores despacháveis reativa;

$P_{load_k}$ : potência líquida ativa da barra k;

$Q_{load_k}$ : potência líquida reativa da barra k;

$P_{calc_k}$ : potência calculada ativa da barra k;

$Q_{calc_k}$ : potência calculada reativa da barra  $k$ ;

$\omega$  e  $V^k$ : variáveis de estado do fluxo de potência;

$m$  e  $n$ : baseados na característica de *droop* dos controladores;

$|Y_{kn}^+|$  e  $\theta_{kn}^+$ : magnitude e o ângulo da admitância de sequência positiva entre as barras  $k$  e

$n$ ;

$nb$ : número de barras;

$ng$ : número de geradores.

- **Mismatches de potência do sistema**

$$\Delta P_{sys} = \left( \sum_{k=1}^{nb} P_{load_k} + P_{loss} \right) - \sum_{k=1}^{ng} P_{gk} \quad (18)$$

$$\Delta Q_{sys} = \left( \sum_{k=1}^{nb} Q_{load_k} + Q_{loss} \right) - \sum_{k=1}^{ng} Q_{gk} \quad (19)$$

Em que:

$$P_{loss} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^{nb} \sum_{n=1}^{nb} \Re (\tilde{Y}_{kn} (\tilde{V}_k * \tilde{V}_n + \tilde{V}_n * \tilde{V}_k)) \quad (20)$$

$$Q_{loss} = -\frac{1}{2} \sum_{k=1}^{nb} \sum_{n=1}^{nb} \Im (\tilde{Y}_{kn} (\tilde{V}_k * \tilde{V}_n + \tilde{V}_n * \tilde{V}_k)) \quad (21)$$

- **Processo de iteração**

Esse processo é feito por aproximação tangencial, vindo da derivada das equações com relação às suas variáveis. Com isso, segundo o método de Newton-Raphson, a estimativa dos novos valores ( $t + 1$ ) de uma iteração  $t$  é calculado como mostrado a seguir.

$$\mathbf{x}^{t+1} = \mathbf{x}^t - ([J]^{-1})^t \mathbf{f}^t \quad (22)$$

- **Matriz Jacobiana e derivadas parciais**

A Matriz Jacobiana  $[J]$  formada através das estimativas dos valores das variáveis de estado por meio das derivadas parciais do conjunto de equações  $f$  em relação ao conjunto de variáveis de estado  $x$ , é:

$$\begin{bmatrix} \frac{d\mathbf{f}}{d\mathbf{x}} \end{bmatrix} = [J] = \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{d\mathbf{P}}{d\theta} \\ \frac{d\mathbf{P}}{dV} \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} \frac{d\mathbf{P}}{dV_1} \\ \frac{d\mathbf{P}}{d\omega} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} \frac{d\mathbf{Q}}{d\theta} \\ \frac{d\mathbf{Q}}{dV} \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} \frac{d\mathbf{Q}}{dV_1} \\ \frac{d\mathbf{Q}}{d\omega} \end{bmatrix} \\ \frac{dQ_{sys}}{d\theta} & \frac{dQ_{sys}}{dV} & \frac{dQ_{sys}}{dV_1} & \frac{dQ_{sys}}{d\omega} \\ \frac{dP_{sys}}{d\theta} & \frac{dP_{sys}}{dV} & \frac{dP_{sys}}{dV_1} & \frac{dP_{sys}}{d\omega} \end{bmatrix} \quad (23)$$

Em que, as derivadas parciais de  $P$  e  $Q$  com relação às magnitudes de tensão e ângulos são:

$$\frac{dP_k}{d\delta_m} = \begin{cases} \sum_{k=1, k \neq m}^{nb} V_k V_m |Y_{kn}| \cos(\delta_{kn} - \theta_{kn}) & se\ k = m \quad \forall k\ e\ \forall m \neq 1 \\ V_k V_m |Y_{kn}| \sin(\delta_{kn} - \theta_{kn}) & se\ k \neq m \end{cases} \quad (24)$$

$$\frac{dQ_k}{d\delta_m} = \begin{cases} \sum_{k=1, k \neq m}^{nb} V_k V_m |Y_{kn}| \cos(\delta_{kn} - \theta_{kn}) & se\ k = m \quad \forall k\ e\ \forall m \neq 1 \\ -V_k |Y_{kn}| \sin(\delta_{kn} - \theta_{kn}) & se\ k \neq m \end{cases} \quad (25)$$

$$\frac{dP_k}{dV_m} \begin{cases} 2V_k |Y_{kk}| \cos(\delta_{kk}) + \sum_{k=1, k \neq m}^{nb} V_k V_m |Y_{kn}| \cos(\delta_{kn} - \theta_{kn}) & se\ k = m \quad \forall k\ e\ \forall m \\ V_k V_m |Y_{kn}| \cos(\delta_{kn} - \theta_{kn}) & se\ k \neq m \end{cases} \quad (26)$$

$\neq 1$

$$\begin{aligned} & \frac{dQ_k}{dV_m} \\ & = \begin{cases} 2V_k |Y_{kk}| \cos(\delta_{kk}) + \sum_{k=1, k \neq m}^{nb} V_k V_m |Y_{kn}| \cos(\delta_{kn} - \theta_{kn}) & se\ k = m \\ V_k |Y_{kn}| \cos(\delta_{kn} - \theta_{kn}) & se\ k \neq m \end{cases} \quad (27) \end{aligned}$$

As derivadas parciais de  $P$  e  $Q$  em relação à  $\omega$ :

$$\frac{dP}{d\omega} = |V_k| \sum_{n=1}^{nb} \left[ \frac{d|Y_{kn}^+|}{d\omega} |V_n| \cos(\delta_k - \delta_n - \theta_{kn}) + \frac{d\theta_{kn}}{d\omega} |V_n| |Y_{kn}| \sin(\delta_k - \delta_n - \theta_{kn}) \right] \quad (28)$$

$$\frac{dQ}{d\omega} = |V_k| \sum_{n=1}^{nb} \left[ \frac{d|Y_{kn}^+|}{d\omega} |V_n| \cos(\delta_k - \delta_n - \theta_{kn}) + \frac{d\theta_{kn}}{d\omega} |V_n| |Y_{kn}| \sin(\delta_k - \delta_n - \theta_{kn}) \right] \quad (29)$$

Em que:

$$\frac{d|Y_{kn}^+|}{d\omega} = \frac{\frac{X_{kn}^+}{\omega}}{(R_{kn}^{+2} + X_{kn}^{+2})^{\frac{3}{2}}} \quad (30)$$

$$\frac{d\theta_{kn}}{d\omega} = \frac{\frac{X_{kn}^+}{\omega R_{kn}^+}}{1 + \left(\frac{X_{kn}^+}{R_{kn}^+}\right)^2} \quad (31)$$

E por fim,  $P_{sys}$  e  $Q_{sys}$ , que são o acoplamento entre a potência ativa com a frequência e a potência reativa e com a tensão (dependentes das impedâncias de saída dos conversores), respectivamente; e suas derivadas parciais:

$$P_{sys} = \sum_{k=1}^{ng} \frac{\omega_{ref} - \omega}{m_k} \quad (32)$$

$$P_{sys} = \sum_{k=1}^{ng} \frac{\omega_{ref} - \omega}{m_k} \quad (33)$$

Em que:

$$\frac{dP_{sys}}{d\delta_k} = 0 \text{ e } \frac{dP_{sys}}{dV_k} = 0 \quad \forall k \quad (34)$$

$$\frac{dQ_{sys}}{d\delta_k} = 0 \text{ e } \frac{dQ_{sys}}{d\omega} = 0 \quad \forall k \quad (35)$$

$$\frac{dP_{sys}}{d\omega} = \sum_{k=1}^{nb} -\frac{1}{m_k} \quad (36)$$

$$\frac{dQ_{sys}}{dV_k} = \begin{cases} -\frac{1}{n_k}, & \text{se a barra } k \text{ é do tipo } VF \forall k \\ 0 & \text{se caso contrário} \end{cases} \quad (37)$$

Por último, o maior erro associado à  $f$  é analisado. O processo é encerrado se esse valor satisfizer o critério de convergência, caso não satisfaça, as variáveis de estado são atualizadas e o algoritmo é efetuado novamente.

#### 4.4 O algoritmo

##### 4.4.1 Microrredes Ilhadas

No algoritmo de Newton-Raphson Modificado, a preparação do fluxo de potência para microrredes ilhadas possui alguns passos a serem seguidos, que são eles:

1	O algoritmo é inicializado com variáveis de estado de 1 p.u.;
2	A matriz admitância é feita com base na topologia do sistema;
3	Calculam-se as perdas, as potências das cargas e a geração;
4	As baterias são carregadas ou descarregadas (conforme necessidade do sistema);
5	Se o maior valor das <i>mismatches</i> for menor que a tolerância, se encerra o algoritmo e checa-se os limites dos geradores. Caso não,
6	Formula-se a matriz Jacobiana e as variáveis de estado são atualizadas;
7	Volta ao passo 2.

Vale ressaltar que os geradores precisam ser verificados após a convergência. Se houver violação de limite, o gerador assume o comportamento de uma barra PQ.

##### 4.4.2 Microrredes em modo conectado

Em modo conectado, como a frequência e a tensão da barra de referência não são mais tratadas como variáveis de estado, a matriz Jacobiana e as novas variáveis de estado passam a ser:

$$J_{conectada} = \begin{bmatrix} \left[ \frac{dP}{d\delta} \right] & \left[ \frac{dP}{dV} \right] \\ \left[ \frac{dQ}{d\delta} \right] & \left[ \frac{dQ}{dV} \right] \end{bmatrix}; x = \begin{bmatrix} \delta \\ V \end{bmatrix} \quad (38)$$

Mesmo de modo conectado, ela precisa ter seus níveis de frequência e tensão analisados, pois precisa seguir os padrões de qualidade da energia no ponto de conexão. Com isso, faz-se necessário o cálculo do fluxo de potência para que haja esse controle.

#### **4.5 Considerações Finais**

O capítulo mostrou o Método de Newton-Raphson Modificado, ferramenta que será utilizada no desenvolvimento desta dissertação.

O próximo capítulo mostrará o cenário operativo definido que foi utilizado e mostrará resultados da aplicação e validação dessas ferramentas.

## 5. PROPOSTA

A proposta deste trabalho é de considerar um shopping center que em seu estacionamento, é possível carregar um total de 200 veículos. Esse carregamento deve ocorrer apenas no horário noturno e madrugada, das 22h00 às 06h00.

Existem vários modelos de automóveis elétricos disponíveis no mercado. Para realizar as simulações, optou-se por modelos reais. A Tabela 6 mostra as características dos 5 veículos considerados.

A primeira coluna mostra os modelos utilizados. A segunda coluna mostra a tecnologia empregada no sistema de armazenamento do respectivo modelo, a terceira coluna mostra a capacidade nominal de armazenamento de energia do sistema, em kWh e a quarta, a potência de cada um.

Tabela 6- Veículos Elétricos considerados

<b>Modelo</b>	<b>Tipo de bateria</b>	<b>Capacidade (kWh)</b>	<b>Potência (kW)</b>
Kandi K27	Ion-Lítio	17,7	19,85
Nissan Leaf	Ion-Lítio	62	109,59
Toyota Prius Prime	Ion-Lítio	8,8	98,55
Mini Cooper SE	Ion-Lítio	32,6	135,33
BMW i3	Ion-Lítio	37,9	125,03

Por segurança, a bateria não pode ser carregada com potências que excedam o valor máximo nem descarregada abaixo do valor mínimo. O Estado de Carga da bateria, do inglês, *State of Charge* (SoC), é a potência mínima armazenada em cada veículo. A Figura 8 apresenta a curva de carga típica de uma bateria de íon de lítio, utilizada nos veículos elétricos considerados no estudo [23].

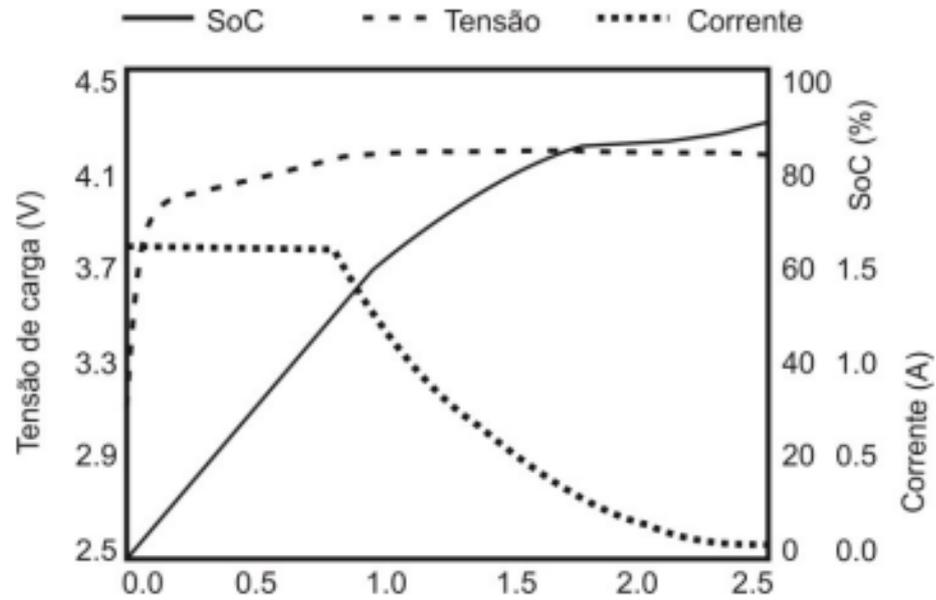


Figura 8- Curva de carga típica de uma bateria de íon de lítio.

Nota-se que enquanto a bateria está em processo de carregamento, o seu SoC aumenta, enquanto a corrente permanece constante e a tensão da carga cresce exponencialmente. Quando a tensão atinge o valor máximo, a curva decai até que o SoC atinja seu valor máximo.

O próximo capítulo mostra o sistema teste implementado e sua eficácia e validação.

## 6. SISTEMA TESTE

---

Para as simulações e avaliações da metodologia proposta, foi utilizado um sistema teste do IEEE com 37 barras. Foram definidos sete cenários operativos a saber: VEs como cargas, VEs como geradores (operação ilhada considerando ou não os SoCs – estes com três valores distintos – em três períodos do dia) a partir dos quais foram obtidos resultados através do fluxo de potência que demonstram a eficácia da metodologia.

Antes de tudo, vale ressaltar algumas considerações:

- O sistema considerado é um equivalente monofásico e equilibrado;
- São utilizados patamares de cargas diferentes e equivalentes a cada categoria de consumidor;
- São utilizadas variações climáticas que afetarão a inserção dos recursos renováveis;
- São utilizados intervalos de 10 minutos de análise nos patamares de cargas;
- As análises foram feitas em dias úteis;
- O tempo de recarga de um veículo elétrico é considerado de no máximo 8 horas;
- Os SoCs dos veículos podem variar;
- Não foram considerados acordos com os proprietários dos veículos;

### 6.1 Sistema Teste Utilizado

Conforme citado anteriormente, o sistema utilizado foi o IEEE 37 *Nodes Test Feeder*. Com o intuito de torná-lo equivalente a uma microrrede, foram inseridos no sistema alguns geradores despacháveis, como painéis fotovoltaicos, turbinas eólicas e veículos elétricos. A potência base do sistema é de 2500 kVA.

Algumas restrições foram consideradas antes de iniciar o processo de recarga dos veículos. Para este sistema, considerou-se uma carga especial; o nó 725 se trata de um shopping center, onde seu estacionamento permite ao todo o carregamento de 200 veículos elétricos somente durante o período noturno e madrugada, das 22h00 às 06h00, período sob análise neste estudo.

De acordo com esses dados, existem 200 veículos neste sistema a serem carregados durante o período proposto, correspondendo a um período de 8 horas. A curva de demanda foi selecionada com um intervalo de 10 minutos entre cada medição, considerando assim a carga do respectivo nó constante durante os próximos 10 minutos.

O sistema com as modificações feitas é apresentado na Figura 9.

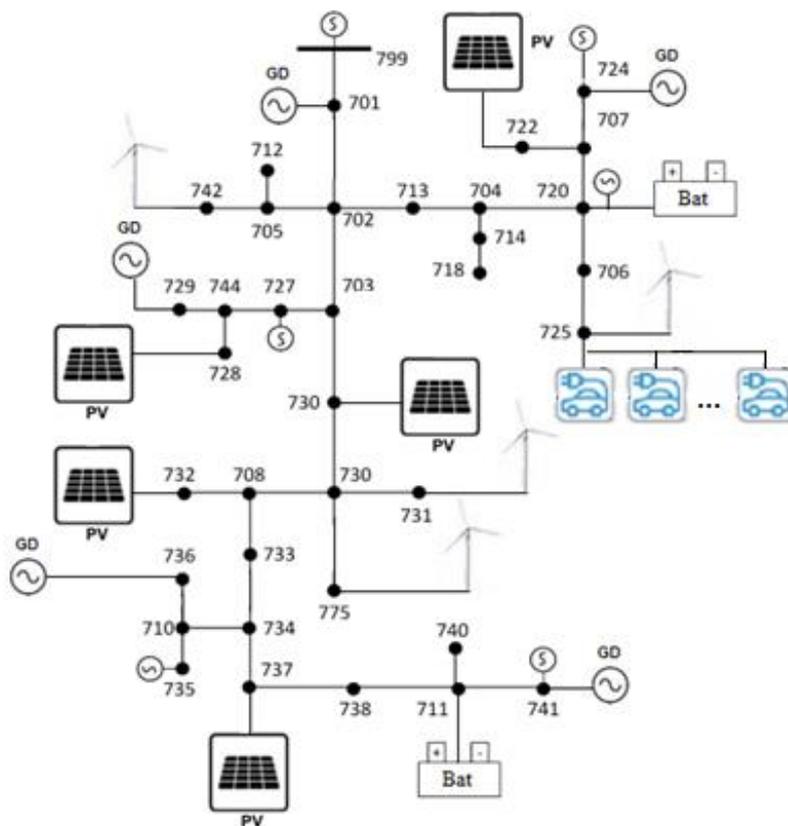


Figura 9- Sistema Teste Modificado.

As Tabelas 7 e 8 tiradas da referência [8], mostram os dados das unidades geradoras despacháveis e das não despacháveis conectadas ao sistema, respectivamente.

Tabela 7- Dados dos Geradores Despacháveis [8]

Barra	$m$	$n$	$P_{m\acute{a}x}$	$Q_{m\acute{a}x}$	$Q_{m\acute{i}n}$
701	0,025	0,015	900	700	-700
729	0,05	0,035	400	300	-300
736	0,025	0,025	900	700	-700
741	0,05	0,045	400	400	-400
724	0,02	0,015	700	600	-600

Tabela 8- Dados dos Geradores Não Despacháveis [8]

Painel Fotovoltaico		
Barra	Potência de Pico (kWp)	FP
722	150	1
730	150	1
728	200	1
737	200	1
732	200	1
Turbina Eólica		

<b>Barra</b>	$v_{ci}(m/s)$	$v_r(m/s)$	$v_{ci}(m/s)$	$P_{wt}^n$	<b>FP</b>
742	4	13	20	50	1
731	4	13	20	50	1
725	4	13	20	50	1
775	4	13	20	50	1

A Tabela 9 mostra a divisão das cargas de acordo com seus perfis de consumo [8].

Tabela 9- Divisão das Cargas em Grupos de Consumo [8]

<b>Grupo</b>	<b>Barra</b>
	<b>Residencial</b>
<b>Alta Renda</b>	703, 704, 705, 706, 707, 709, 711
<b>Média Renda</b>	713, 718, 727, 728, 729, 732, 734
<b>Baixa Renda</b>	735, 736, 738, 741, 775, 799
	<b>Comercial</b>
<b>Pequeno Porte</b>	702, 708, 710, 712
<b>Grande Porte</b>	722, 724, 725, 733, 737, 742
	<b>Industrial</b>
<b>Pequeno Porte</b>	714, 720, 730, 731, 740, 744
<b>Grande Porte</b>	701

A Tabela 10 mostra a divisão das cargas de acordo com a prioridade de fornecimento de eletricidade [8].

Tabela 10- Divisão das Cargas de acordo com a Prioridade [8]

<b>Prioridade</b>	<b>Barras</b>
<b>Baixa</b>	701, 703, 704, 705, 706, 707, 709, 711, 713, 718, 727, 728, 729, 732, 734, 735, 736, 738, 741, 775, 799
<b>Média</b>	702, 708, 710, 712, 714, 720, 730, 731, 740, 744
<b>Alta</b>	722, 724, 725, 733, 737, 742

## 6.2 Validação do Estudo

Em relação à demanda de energia, duas análises foram executadas. A primeira consiste no carregamento dos veículos elétricos (recarga não controlada) em três cenários distintos com a microrrede conectada; e o comportamento das cargas ao longo do tempo de operação. A segunda assume a necessidade de os veículos poderem funcionar como geradores em casos de ilhamento e o quanto vou ter de carga para suprir o sistema, considerando valores específicos de SoC.

Em relação ao cálculo do fluxo de potência, será feita a análise se o sistema é factível operacionalmente.

### 6.2.1 Veículos elétricos como cargas – Microrrede conectada

Quando não existe nenhum tipo de controle no veículo ou gerenciamento por parte de um medidor inteligente, eles começam a carregar imediatamente em plena carga quando são conectados ao sistema até o momento em que carregam completamente ou são desconectados.

A análise da evolução do sistema com o carregamento dos veículos busca a compreensão do comportamento do sistema frente as variações de demanda. Essa análise adota como referência a Barra 725 (considerada comercial de grande porte), contando com o carregamento de 200 veículos em três cenários: considerando que tenho 50% deles carregando, 75% carregando e 100% carregando. Os cálculos das potências de cada veículo são mostrados no Anexo I.

Uma vez que o período sob análise ocorre entre 22:00h e 06:00h e um tempo de carregamento total das 8 horas, os perfis de cargas comerciais do sistema (em pu) durante todo o dia e em intervalos de 10 minutos durante o momento de carregamento estão ilustrados a seguir nas Figuras 10 e 11.

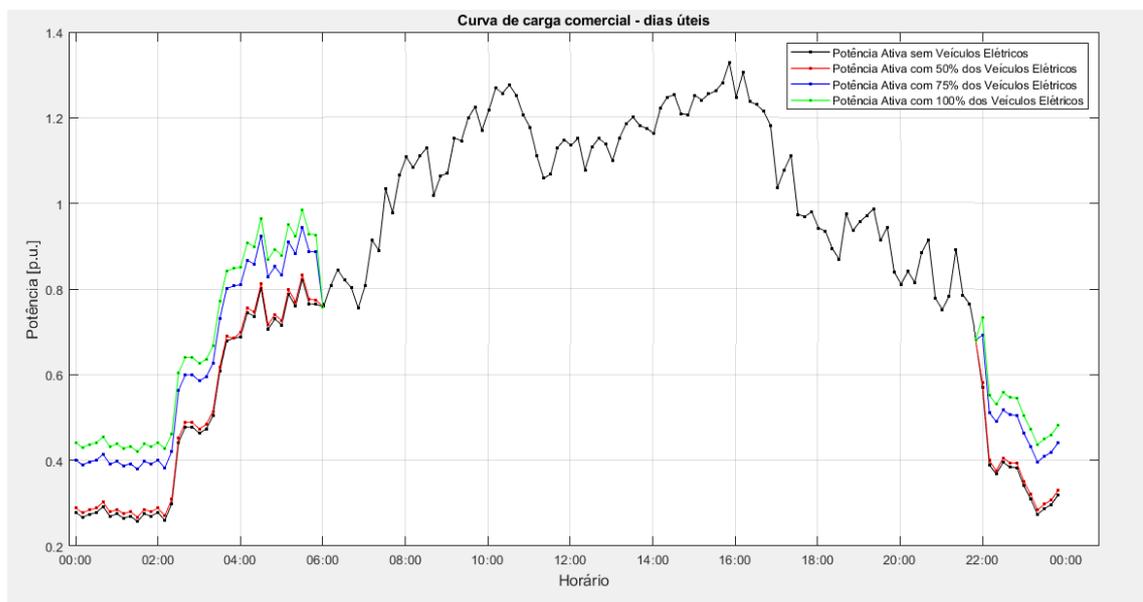


Figura 10- Demanda de Potência Ativa durante todo o dia

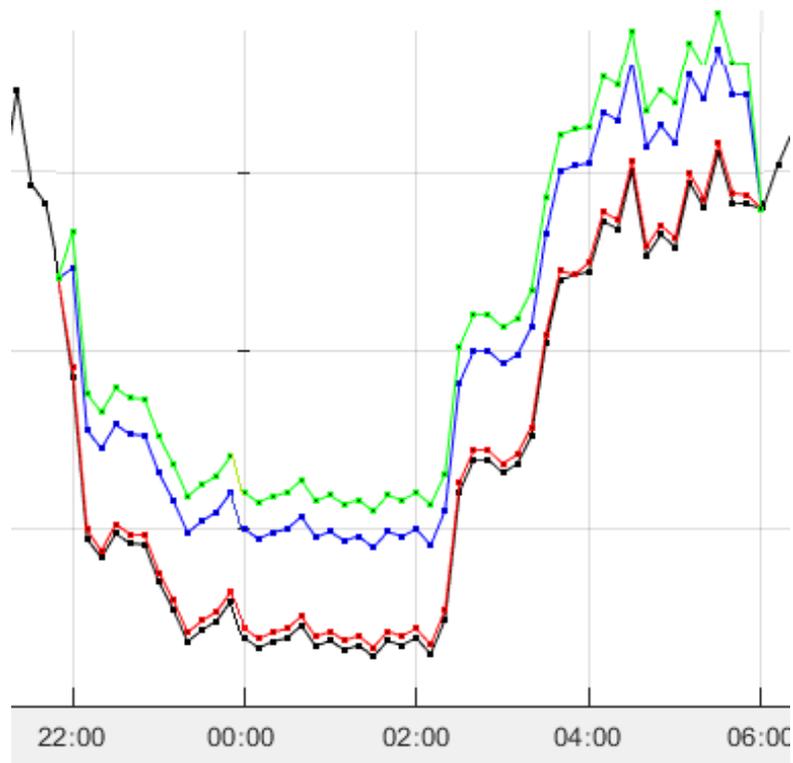


Figura 11- Demanda de Potência Ativa entre 22h00 e 06h00

As figuras mostram que durante todo o período, com 50% dos veículos carregando, o maior valor de potência ativa no sistema é de 0,90339 pu. Com 75% dos veículos, 0,9408 pu; e com 100%, o maior valor é de 0,98478 pu e todos às 05h40. Os valores das cargas (em pu) sem o carregamento dos veículos e com o carregamento dos veículos, respectivamente, são detalhados nas Tabelas 11 e 12.

Tabela 11- Demanda de Potência Ativa das Cargas Comerciais sem o carregamento dos veículos elétricos

<b>Horário</b>	<b>SEM VEÍCULOS</b>	<b>Horário</b>	<b>SEM VEÍCULOS</b>
	<b>(pu)</b>		<b>(pu)</b>
<b>22h00</b>	0,57	<b>02h00</b>	0,278
<b>22h10</b>	0,389	<b>02h10</b>	0,26
<b>22h20</b>	0,368	<b>02h20</b>	0,299
<b>22h30</b>	0,395	<b>02h30</b>	0,442
<b>22h40</b>	0,384	<b>02h40</b>	0,478
<b>22h50</b>	0,383	<b>02h50</b>	0,478
<b>23h00</b>	0,341	<b>03h00</b>	0,463

<b>23h10</b>	0,31	<b>03h10</b>	0,473
<b>23h20</b>	0,274	<b>03h20</b>	0,504
<b>23h30</b>	0,287	<b>03h30</b>	0,608
<b>23h40</b>	0,297	<b>03h40</b>	0,679
<b>23h50</b>	0,319	<b>03h50</b>	0,685
<b>00h00</b>	0,279	<b>04h00</b>	0,688
<b>00h10</b>	0,267	<b>04h10</b>	0,745
<b>00h20</b>	0,274	<b>04h20</b>	0,736
<b>00h30</b>	0,278	<b>04h30</b>	0,802
<b>00h40</b>	0,292	<b>04h50</b>	0,706
<b>00h50</b>	0,269	<b>05h00</b>	0,73
<b>01h00</b>	0,275	<b>05h10</b>	0,716
<b>01h10</b>	0,265	<b>05h20</b>	0,788
<b>01h20</b>	0,27	<b>05h30</b>	0,76
<b>01h30</b>	0,257	<b>05h40</b>	0,822
<b>01h40</b>	0,275	<b>05h50</b>	0,766
<b>01h50</b>	0,27	<b>06h00</b>	0,764

Tabela 12- Demanda de Potência Ativa das Cargas Comerciais com o carregamento dos veículos elétricos

<b>COM VEÍCULOS CARREGANDO (pu)</b>							
<b>Horas</b>	<b>100%</b>	<b>75%</b>	<b>50%</b>	<b>Horas</b>	<b>100%</b>	<b>75%</b>	<b>50%</b>
<b>22h00</b>	0,732783	0,6920875	0,651391	<b>02h00</b>	0,440783	0,4000875	0,359391
<b>22h10</b>	0,551783	0,5110875	0,470391	<b>02h10</b>	0,422783	0,3820875	0,341391
<b>22h20</b>	0,530783	0,4900875	0,449391	<b>02h20</b>	0,461783	0,4210875	0,380391
<b>22h30</b>	0,557783	0,5170875	0,476391	<b>02h30</b>	0,604783	0,5640875	0,523391
<b>22h40</b>	0,546783	0,5060875	0,465391	<b>02h40</b>	0,640783	0,6000875	0,559391
<b>22h50</b>	0,545783	0,5050875	0,464391	<b>02h50</b>	0,640783	0,6000875	0,559391
<b>23h00</b>	0,503783	0,4630875	0,422391	<b>03h00</b>	0,625783	0,5850875	0,544391
<b>23h10</b>	0,472783	0,4320875	0,391391	<b>03h10</b>	0,635783	0,5950875	0,554391
<b>23h20</b>	0,436783	0,3960875	0,355391	<b>03h20</b>	0,666783	0,6260875	0,585391
<b>23h30</b>	0,449783	0,4090875	0,368391	<b>03h30</b>	0,770783	0,7300875	0,689391
<b>23h40</b>	0,459783	0,4190875	0,378391	<b>03h40</b>	0,841783	0,8010875	0,760391

<b>23h50</b>	0,481783	0,4410875	0,400391	<b>03h50</b>	0,847783	0,8070875	0,766391
<b>00h00</b>	0,441783	0,4010875	0,360391	<b>04h00</b>	0,850783	0,8100875	0,769391
<b>00h10</b>	0,429783	0,3890875	0,348391	<b>04h10</b>	0,907783	0,8670875	0,826391
<b>00h20</b>	0,436783	0,3960875	0,355391	<b>04h20</b>	0,898783	0,8580875	0,817391
<b>00h30</b>	0,440783	0,4000875	0,359391	<b>04h30</b>	0,964783	0,9240875	0,883391
<b>00h40</b>	0,454783	0,4140875	0,373391	<b>04h50</b>	0,868783	0,8280875	0,787391
<b>00h50</b>	0,431783	0,3910875	0,350391	<b>05h00</b>	0,892783	0,8520875	0,811391
<b>01h00</b>	0,437783	0,3970875	0,356391	<b>05h10</b>	0,878783	0,8380875	0,797391
<b>01h10</b>	0,427783	0,3870875	0,346391	<b>05h20</b>	0,950783	0,9100875	0,869391
<b>01h20</b>	0,432783	0,3920875	0,351391	<b>05h30</b>	0,922783	0,8820875	0,841391
<b>01h30</b>	0,419783	0,3790875	0,338391	<b>05h40</b>	0,984783	0,9440875	0,903391
<b>01h40</b>	0,437783	0,3970875	0,356391	<b>05h50</b>	0,928783	0,8880875	0,847391
<b>01h50</b>	0,432783	0,3920875	0,351391	<b>06h00</b>	0,926783	0,8860875	0,845391

Porém, a recarga não controlada de veículos elétricos em sistemas de distribuição pode acarretar violações de tensão e aumento das perdas elétricas no sistema. Havendo assim, a necessidade de gerenciar o carregamento dos veículos para evitar então, sobtensões e perdas elevadas.

As Figuras 12 e 13 mostram o perfil das tensões nos barramentos do sistema e o perfil de geração quando a microrrede está conectada. O resultado mostra que as tensões se mantêm quase a todo momento em 1 pu,

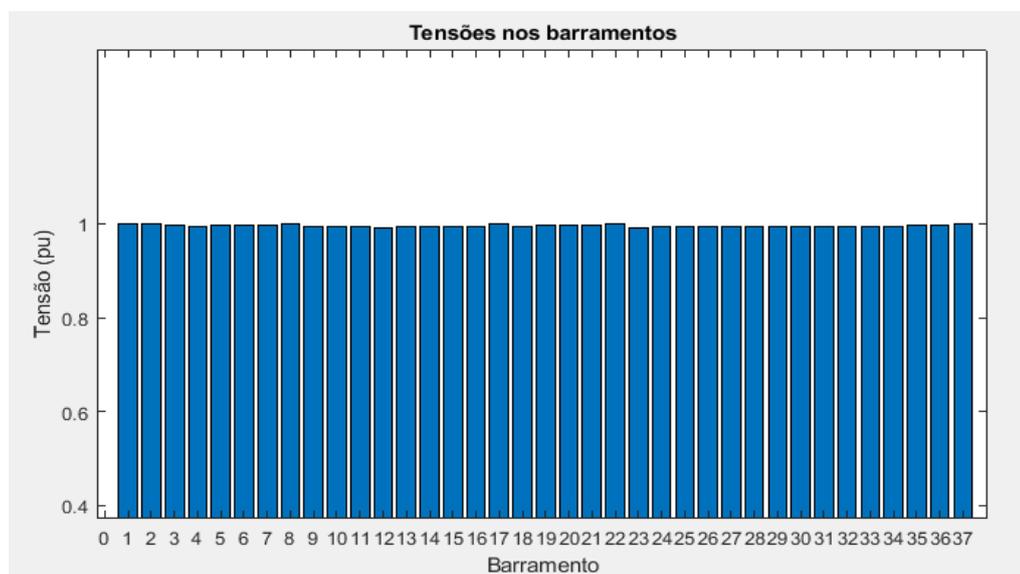


Figura 12- Tensões nas barras em modo conectado

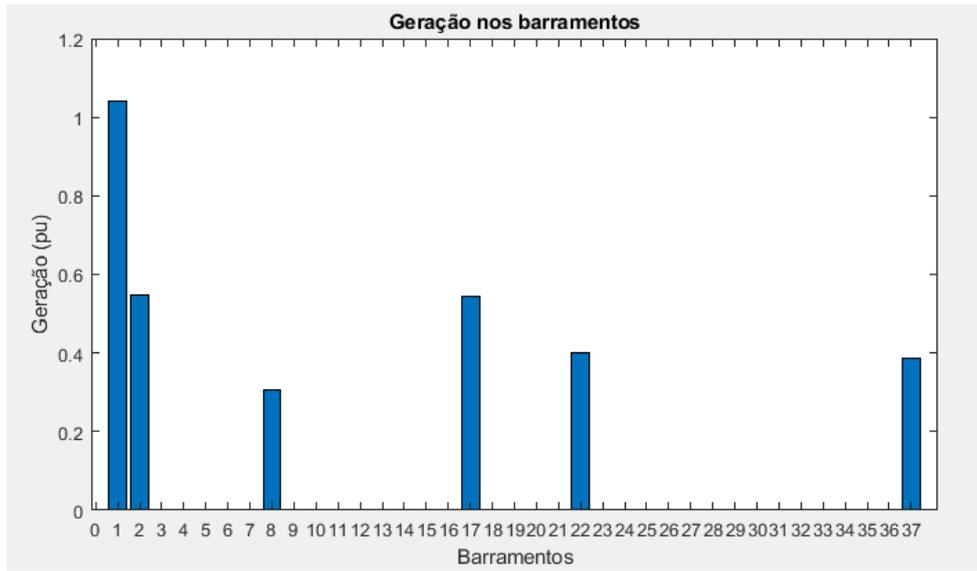


Figura 13- Geração nos barramentos em modo conectado

Realizando o fluxo de potência, o sistema convergiu em 3 iterações até atingir a tolerância, com um erro de  $4,3769e^{-5}$ .

Os próximos cenários analisarão a microrrede atuando de maneira ilhada e com os veículos elétricos podendo funcionar como geradores.

### 6.2.2 Veículos elétricos como fonte – Microrrede Ilhada

Essa análise visa compreender o comportamento das cargas caso o sistema passe a operar de modo ilhado. As análises foram executadas em três cenários diferentes, havendo desconexões em horários distintos durante o dia. As gerações consideradas para o suprimento da energia e suas respectivas potências são mostradas na Tabela 13.

Tabela 13- Potências dos meios de gerações

Geração	Pot. (kW)	Pot. (pu)
PV's	600	0,24
Eólica	600	0,24
Bateria	30	0,012
Despacháveis	11100	4,44

▪ **Cenário 1: desconexão da 01h00 às 02h00 sem considerar os valores de SoC das baterias dos veículos elétricos**

Nesse período analisado, os veículos estavam carregando e foram desconectados do sistema pelo ilhamento, ou seja, teriam sido carregados das 22h00 às 01h00, tendo apenas três horas de carregamento.

A Tabela 14 mostra as cargas do sistema por grupo de consumo no momento da desconexão.

Tabela 14- Cargas do sistema no momento da desconexão

<b>Cargas</b>	<b>Carga total (pu)</b>
Comercial	1,89
Residencial Alta Renda	4,409
Residencial Média Renda	2,16
Residencial Baixa Renda	1,916
Industrial	1,83
<b>Total</b>	<b>12,205</b>

Como esse cenário acontece durante a madrugada, não há geração dos PV's, sendo assim, a Tabela 15 apresenta o quanto de potência dos geradores tenho para suprir o sistema no momento da desconexão.

Tabela 15- Potências dos geradores no momento da desconexão

<b>Geração</b>	<b>Valor (pu)</b>
PV's	0
Eólica	0,24
Baterias	0,012
Despacháveis	4,44
100% Veículos (3h de carregamento)	2,9301
75% Veículos (3h de carregamento)	2,197575
50% Veículos (3h de carregamento)	1,46505

Total 100% VE's	7,6221
Total 75% VE's	6,889575
Total 50% VE's	6,15705

Considerando a Tabela 14, e analisando conforme prioridade das cargas, foi possível concluir que os geradores despacháveis, não despacháveis e os veículos elétricos:

- Se 100%, 75% e 50% dos veículos estivessem carregando no momento da desconexão, são capazes de suprir juntos, as cargas de alta prioridade, que fazem parte do grupo de consumo de cargas comerciais de pequeno e grande porte; as de média prioridade, que fazem parte do grupo de consumo de cargas industriais de pequeno porte; e uma boa parte das cargas de baixa prioridade, que incluem as residenciais de baixa e média renda. Não sendo capaz de suprir apenas todas as residências de alta e média renda (baixa prioridade).

▪ **Cenário 2: desconexão da 01h00 às 02h00 considerando os valores de SoC das baterias dos veículos elétricos**

Foram aplicados três diferentes valores de SoC das baterias dos veículos elétricos (em pu), considerando apenas 100% dos veículos com três horas de carregamento, dados na Tabela 16.

Tabela 16- Valores de SoC das baterias

	100% dos Veículos		
	60%	70%	80%
Todo período	4,68816	5,46952	6,25088
3h carregamento	1,75806	2,05107	2,34408

Com isso, atualizando a Tabela 17, tem-se:

Tabela 17- Potências dos geradores no momento da desconexão considerando SoC dos veículos

Geração	Valor (pu)
PV's	0
Eólica	0,24

Baterias	0,012
Despacháveis	4,44
SoC 60%	1,75806
SoC 70%	2,05107
SoC 80%	2,34408
<b>Total SoC 60%</b>	<b>6,45006</b>
<b>Total SoC 70%</b>	<b>6,74307</b>
<b>Total SoC 80%</b>	<b>7,03608</b>

Novamente, conforme prioridade das cargas, conclui-se que mesmo com o menor valor de SoC considerado das baterias dos veículos, os geradores são capazes de suprir a maior parte das cargas do sistema durante a desconexão.

▪ **Cenário 3: desconexão em um horário de pico, das 18h00 às 19h00 sem considerar os valores de SoC das baterias dos veículos elétricos**

As cargas do sistema e as potências dos geradores neste momento de desconexão são mostradas na Tabela 18 e Tabela 19 respectivamente. Já neste cenário, foi considerado que os veículos estavam completamente carregados.

Tabela 18- Cargas do sistema no momento da desconexão

<b>Cargas</b>	<b>Carga total (pu)</b>
Comercial	6,517
Residencial Alta Renda	4,792
Residencial Média Renda	5,473
Residencial Baixa Renda	7,744
Industrial	3,81
<b>Total</b>	<b>28,336</b>

Tabela 19- Potências dos geradores no momento da desconexão

<b>Geração</b>	<b>Valor (pu)</b>
PV's	0
Eólica	0,24
Baterias	0,012

Despacháveis	4,44
100% Veículos	7,8136
75% Veículos	5,8602
50% Veículos	3,9068
<b>Total 100% VE's</b>	<b>12,5056</b>
<b>Total 75% VE's</b>	<b>10,5522</b>
<b>Total 50% VE's</b>	<b>8,5988</b>

Sendo assim, é possível concluir que:

- Com 100% e 75% dos veículos podendo atuar como geradores com suas baterias totalmente carregadas, são capazes de suprir todas as cargas de alta e média prioridades.
- Com 50% dos veículos, são capazes de suprir todas as cargas de alta prioridade e algumas de média prioridade.

▪ **Cenário 4: desconexão em um horário de pico, das 18h00 às 19h00 considerando os valores de SoC das baterias dos veículos elétricos**

Assim como no cenário 2, foram aplicados três diferentes valores de SoC das baterias dos veículos elétricos (em pu), considerando apenas 100% dos veículos com as oito horas totais de carregamento, dados na Tabela 20.

Tabela 20- Potências dos geradores no momento da desconexão considerando SoC dos veículos

<b>Geração</b>	<b>Valor (pu)</b>
PV's	0
Eólica	0,24
Baterias	0,012
Despacháveis	4,44
SoC 60%	4,68816
SoC 70%	5,46952
SoC 80%	6,25088
<b>Total SoC 60%</b>	<b>9,38016</b>
<b>Total SoC 70%</b>	<b>10,16152</b>

<b>Total SoC 80%</b>	<b>10,94288</b>
----------------------	-----------------

Tem-se que com o SoC de 80% das baterias dos veículos, os geradores são capazes de suprir todas as cargas de alta prioridade, que totalizam 10,327 pu. Já com os SoC's de 70% e 60%, suprem quase todas as cargas de alta prioridade.

▪ **Cenário 5: desconexão das 10h00 às 10h30 sem considerar os valores de SoC das baterias dos veículos elétricos**

Seguindo a estrutura dos cenários anteriores, as Tabelas 21 e Tabela 22 mostram as cargas do sistema e as potências dos geradores neste momento de desconexão. Porém, agora considerou-se geração nas PV's.

Tabela 21- Cargas do sistema no momento da desconexão

<b>Cargas</b>	<b>Carga total (pu)</b>
Comercial	5,011
Alta Renda	2,151
Média Renda	1,902
Residencial Baixa Renda	1,339
Industrial	3,64
<b>Total</b>	<b>14,043</b>

Tabela 22- Potências dos geradores no momento da desconexão

<b>Geração</b>	<b>Valor (pu)</b>
PV's	0,24
Eólica	0,24
Baterias	0,012
Despacháveis	4,44
100% Veículos	7,8136
75% Veículos	5,8602
50% Veículos	3,9068
<b>Total 100% VE's</b>	<b>12,7456</b>
<b>Total 75% VE's</b>	<b>10,7922</b>
<b>Total 50% VE's</b>	<b>8,8388</b>

Neste cenário:

- Com 100% dos veículos, supre quase todas as cargas do sistema, faltando apenas 1,2974 pu.
- Com 75% dos veículos, supre todas as cargas de alta prioridade, todas de média prioridade e as de baixa prioridade, apenas as residenciais de baixa renda.
- Com 50% dos veículos, supre quase todas as cargas de alta prioridade.

▪ **Cenário 6: desconexão das 10h00 às 10h30 considerando os valores de SoC das baterias dos veículos elétricos**

Utilizando novamente os três diferentes valores de SoC das baterias dos veículos elétricos, as potências dos geradores no momento da desconexão são mostradas a seguir.

Tabela 23- Potências dos geradores no momento da desconexão considerando SoC dos veículos

<b>Geração</b>	<b>Valor (pu)</b>
PV's	0,24
Eólica	0,24
Baterias	0,012
Despacháveis	4,44
SoC 60%	4,68816
SoC 70%	5,46952
SoC 80%	6,25088
<b>Total SoC 60%</b>	<b>9,62016</b>
<b>Total SoC 70%</b>	<b>10,40152</b>
<b>Total SoC 80%</b>	<b>11,18288</b>

Com isso, conclui-se que:

- Com os veículos com SoC de 70% e 80% são capazes de suprir todas as cargas de alta e média prioridades, e uma parte da baixa prioridade, sendo as cargas residenciais de alta renda.
- Com SoC de 60%, é capaz de suprir apenas as cargas da alta prioridade.

▪ **Cenário 7: Fluxo de potência no momento do ilhamento**

Nessa seção, foi feito o cálculo do fluxo de potência em momento de desconexão, para analisar os níveis de tensão e ver se o sistema é factível operacionalmente.

Em relação ao modo de operação, utilizou-se o controle primário, em que o coeficiente *droop* é inversamente proporcional a tensão e a frequência, ou seja, quanto maior for o coeficiente *droop*, menor será a parcela da demanda da unidade geradora.

A Figura 14 mostra o perfil de tensão nas barras.

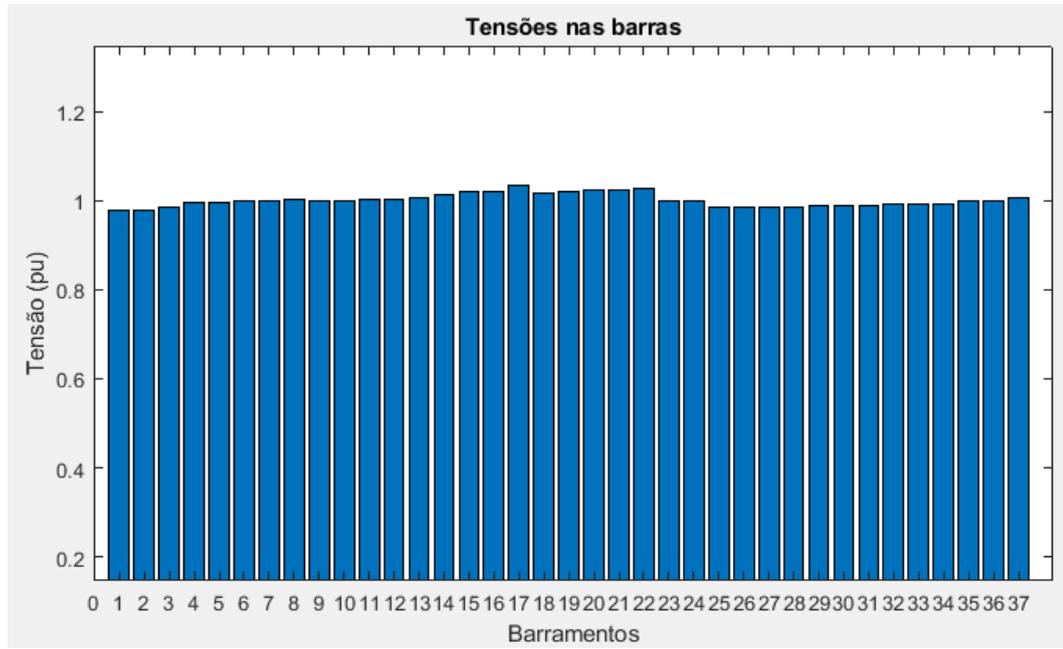


Figura 14- Perfil de tensão nas barras em modo ilhado

## 7. CONCLUSÃO

---

É visto que na evolução dos sistemas elétricos têm-se as microrredes e principalmente a inserção de veículos elétricos na rede. As transformações exigidas no setor elétrico visam ao desenvolvimento de um sistema que seja capaz de suprir a demanda energética com alta qualidade, respeitando o meio ambiente e sendo confiável e sustentável.

Neste novo cenário, o planejamento do sistema elétrico deve ter uma concepção de uma infraestrutura dinâmica que use tecnologias inteligentes e presentes no cotidiano, como o exemplo dos veículos elétricos e híbridos recarregáveis, a fim de ter um controle global de maneira versátil, flexível e que conserve a eficiência energética.

Os veículos elétricos são uma nova tendência dentro do mercado automobilístico, que se torna cada vez mais competitivo, e que é sinalizado pelo uso de tecnologias mais limpas no futuro e a substituição aos derivados do petróleo. Porém, ainda possuem baixa autonomia devido ao seu sistema de armazenamento de energia.

O carregamento dos veículos elétricos nos sistemas de distribuição se tornará um problema à medida que seu uso aumentar. Conforme já explicado em diversas referências, o carregamento das baterias ao mesmo tempo pode ocasionar diversos problemas em nível de distribuição, como violações de limites de tensão, sobrecargas e aumento de harmônicos no sistema.

O algoritmo de fluxo de potência é capaz de determinar o estado da microrrede com suas peculiaridades implementadas. A proposta de um esquema de recarga foi desenvolvida. Foi realizada no período noturno no estacionamento de um shopping center, durante um período de 8 horas, das 22h00h até as 06h00.

A ideia fundamental da recarga é não violar os limites de tensão do sistema e não haver sobrecargas. Com isso, torna-se necessário um esquema organizado de recarga, que será utilizado em um trabalho futuro.

Tendo em vista a característica de pequena escala da geração distribuída, uma microrrede pode não ser capaz de suprir toda a demanda. Com isso, os veículos elétricos são capazes de funcionar como geradores, considerando valores diferentes de SoC, para suprir as cargas no sistema, e principalmente as cargas prioritárias.

O estudo mostrou bons resultados, visto que não houve tanta oscilação nos níveis de tensão. Porém, é necessária a aplicação de um esquema de recarga controlada, e para suprir a carga total do sistema, seriam necessárias mais baterias.

A proposta deste trabalho é uma contribuição no estudo da inserção de veículos elétricos em microrredes, seguindo a tendência de funcionarem como cargas e como geradores.

### **7.1 Temas para trabalhos futuros**

Ainda existem muitas questões relacionadas à inserção de veículos elétricos em sistemas de distribuição que podem ser objetos de pesquisa.

Os temas relacionados ao controle de tensão e frequência e meios eficientes de comunicação do sistema; desenvolvimento de técnicas de controle inteligentes; dentre outras possibilidades.

Alguns tópicos que podem ser abordados futuramente são:

- Utilização de ferramentas de otimização;
- Possibilidade de remuneração de serviços por meio de V2G para veículos elétricos no sistema brasileiro;
- Pesquisa dos aspectos econômicos relacionados à integração de veículos elétricos em sistemas de distribuição.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] C. Basso; "O impacto dos veículos elétricos Plug-in no sistema elétricos de potência," Universidade Federal do Pampa. Alegrete, 2011.
- [2] O setor elétrico brasileiro e a sua evolução tecnológica - PixForce
- [3] EPE, "Plano Decenal de Expansão de Energia 2030," Rio de Janeiro, 2021.
- [4] P. W. Barbosa, S. C. A. Azevedo (20xx). Geração distribuída: vantagens e desvantagens. II Simpósio de Estudos e Pesquisas em Ciências Ambientais na Amazônia.
- [5] P. Chiaradia.; "Estudo de viabilidade técnico-econômica para projetos de políticas públicas de inserção de geração distribuída no sistema elétrico brasileiro," Centro Universitário de Itajubá, 2016.
- [6] M. Masera, E. F. Bompard, F. Profumo, and N. Hadjsaid, "Smart (Electricity) Grids for Smart Cities: Assessing Roles and Societal Impacts," Proc. IEEE, vol. 106, no. 4, pp. 613-624, 2018.
- [7] [http://civil.uminho.pt/urbanere/wp-content/uploads/2015/12/4\\_Smart\\_Grid.pdf](http://civil.uminho.pt/urbanere/wp-content/uploads/2015/12/4_Smart_Grid.pdf)
- [8] B. de Nadai N., "Controle secundário aliado ao corte de carga para microrredes em condições operativas de ilhamento," Universidade Federal de Itajubá, 2019.
- [9] D. Queiroz Oliveira, "Sistema de Gerenciamento de Energia para Operação Resiliente de Microrredes em Modo Olhado," Universidade Federal de Itajubá, 2015.
- [10] CCEE. Câmara de Comercialização de Energia Elétrica. Fontes de Energia, 2015.
- [11] O Sistema Elétrico. USP. Disponível em: <https://sistemas.eel.usp.br/docentes/arquivos/5840834/59/SistemaEletrico1.pdf>. Acesso em: 23 jul. 2022.
- [12] X. Mosquet, A. Dinger, G. Xu, M. Andersen, K. Tominaga, H. Zablitz, "The Electric Car Tipping Point", 2018.
- [13] M. H. Hemmatpour, M. H. R. Koochi, P. Dehghanian, P. Dehghaian, "Voltage and energy control in distribution systems in the presence of flexible loads considering coordinated charging of electric vehicles," in Energy, 2022.
- [14] The Smart Grid could hold the keys to Electric Vehicles. Disponível em: <https://innovationatwork.ieee.org/the-smart-grid-could-hold-the-keys-to-electric-vehicles/>. Acesso em: 23 jul. 2022.
- [15] M. F. Silva, "Uma contribuição para o suporte à estabilidade de frequência no contexto das microrredes por meio de um sistema de armazenamento de energia a bateria," Universidade Federal de Uberlândia, 2020.

- [16] H. A. Barata, V. C. Souza, W. D. Oliveira, J. P. A. Viera, "Impacto de redes de distribuição ativas com massiva conexão de geradores fotovoltaicos na estabilidade de tensão de longo prazo em sistemas de potência," 2017, XVII ERIAC.
- [17] D. Marujo, "Estabilidade de sistemas elétricos de potência com a presença de redes de distribuição ativas," Universidade Federal de Itajubá, 2017.
- [18] N. H. Phuong, "Multi-Agent System based Active Distribution Networks, Technische Universiteit Eindhoven," 2010, Disponível em: <<http://alexandria.tue.nl/extra2/693215.pdf>>. Acesso em: 23 out. 2022.
- [19] M. M. Preto, "Redes de distribuição ativas," Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2012.
- [20] J. V. A. Leite, A. F. S. Cruz, "Estudo e aplicação da Smart Grid no Sistema Elétrico de Distribuição Brasileiro", XVI SEPA - Seminário Estudantil de Produção Acadêmica, UNIFACS, 2017.
- [21] D. Q. Oliveira, "Sistema de gerenciamento de energia para operação resiliente de microrredes em modo ilhado," Universidade Federal de Itajubá, 2015.
- [22] N. M. D. Lima, "Comparação de estratégias de carregamento de veículos elétricos", Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2012.
- [23] G. Fiorese, "Microrrede com veículos elétricos: impacto na vida útil das baterias conectadas à rede," Universidade Federal de Itajubá, 2019.
- [24] R. Mehta et al., Smart Charging Strategies for Optimal Integration of Plug-In Electric Vehicles Within Existing Distribution System Infrastructure. IEEE Transactions on Smart Grid. Vol: 9, pp. 1-14, 2018.
- [25] V. T. Arioli, "Análise de impactos técnicos provocados pela penetração massiva de veículos elétricos em redes de distribuição de energia elétrica", Universidade Estadual de Campinas, 2016.
- [26] Dubey, S. Santoso, Electric vehicle charging on residential distribution systems: impacts and mitigations. Published in IEEE access. Vol: 3 September, 2015. Electronic ISSN: 2169,3536.
- [27] M. A. L. Viana, "Controle de tensão em uma microrrede isolada empregando controladores robustos via desigualdades matriciais lineares," Universidade Federal de Ouro Preto, 2022.
- [28] C. Jin, M. Gao, X. Lv, and M. Chen, "A Seamless Transfer Strategy of Islanded and Grid-connected Mode Switching for Microgrid based on Droop Control," in IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, 2012, pp. 969–973.

- [29] J. W. Simpson-Porco, Q. Shafiee, F. Dorfler, J. C. Vasquez, J. M. Guerrero, and F. Bullo, "Secondary Frequency and Voltage Control of Islanded Microgrids via Distributed Averaging", *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 62, n° 11, p. 7025-7038, 2015, doi: 10.1109/TIE.2015.2436879.
- [30] F. Mumtaz et al., "A Novel Approach to Solve Power Flow for Islanded Microgrids Using Modified Newton Raphson With Droop Control of DG," *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 7, no. 2, pp. 493–503, Apr. 2016.
- [31] L. Ren and P. Zhang, "Generalized Microgrid Power Flow," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 9, no. 4, pp. 3911–3913, 2018.
- [32] J. Monticelli, "Automation of Distribution of Electrical Energy: Simulation Using Fast Decoupled Power Flow," in *Congresso Brasileiro de Automática*, 1984, pp. 256–261.
- [33] P. J. Lagace, M. H. Vuong, and I. Kamwa, "Improving Power Flow Convergence by Newton Raphson with a Levenberg-Marquardt Method," in *IEEE Power and Energy Society 2008 General Meeting: Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century*, PES, 2008, pp. 1–6.
- [34] J. E. Sarmiento, E. M. Carreno, and A. C. Zambroni de Souza, "Modeling Inverters with Volt-Var Functions in Grid-Connected Mode and Droop Control Method in Islanded Mode," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 155, pp. 265–273, Nov. 2018.
- [35] H. Moradi, V. B. Foroutan, and M. Abedini, "Power flow analysis in islanded Micro-Grids via modeling different operational modes of DGs: A review and a new approach," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 69, no. August 2015, pp. 248–262, 2017.
- [36] B. N. Nascimento, "Uma Proposta de Metodologia de Corte de Carga em Microrredes Ilhadas," *Universidade Federal de Itajubá*, 2016.
- [37] M. Brandstetter, A. Schirrer, M. Miletić, S. Henein, M. Kozek, and F. Kupzog, "Hierarchical predictive load control in smart grids," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 8, no. 1, pp. 190–199, 2017.
- [38] J. M. Guerrero, J. C. Vasquez, J. Matas, L. García de Vicuña and M. Castilla,
- [39] "Hierarchical Control of Droop-Controlled AC and DC Microgrids - A General Approach
- [40] Toward Standardization," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, v. 58, no. 1, pp. 158-172, 2011. ISSN 02778-0046.
- [41] ANEEL, Resolução Normativa N°414. Brazil: (in portuguese), 2011.
- [42] C. Zambroni de Souza, M. Santos, M. Castilla, J. Miret, L. García de Vicuña, and D. Marujo, "Voltage security in AC microgrids: a power flow-based approach considering droop-controlled inverters," *IET Renew. Power Gener.*, vol. 9, no. 8, pp. 954–960, May 2015.

- [43] M. Pesin and J. Paladino, "Impact of IEEE 1547 Standard on Smart Inverters," Washington, 2018.
- [44] J. C. Lima, E. M. Lourenço, M. M. Filho, "Impacto da conexão de veículos elétricos em redes de distribuição de energia elétrica," Anais do XIX Congresso Brasileiro de Automática, CBA 2012, 2012.
- [45] ANEEL. Disponível em: <<https://www.aneel.gov.br/estacoes-de-recarga-de-veiculos-eletricos>>. Acesso em: 23 jul. 2022.
- [46] Estação de recarga – Veículo elétrico. Disponível em: <<https://www.neocharge.com.br/tudo-sobre/carro-eletrico/autonomia>> Acesso em: 23 jul. 2022.
- [47] S. de Araújo, "Controle de Tensão em Sistemas de Distribuição considerando a Inserção de Veículos Elétricos," Universidade Federal da Paraíba, 2017.
- [48] M. A. Haidar, K. M. Muttaqi, "Behavioral characterization of electric vehicle charging loads in a distribution power grid through modeling of battery chargers," IEEE Industry Application Society Annual Meeting, 2014.
- [49] T. Noce, "Estudo do funcionamento de veículos elétricos e contribuições ao seu aperfeiçoamento," Universidade Católica de Minas Gerais, 2009.
- [50] BNDES- Veículos elétricos: aspectos básicos, perspectivas e oportunidades. Disponível em: <[https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/1764/2/BS%2032%20Ve%c3%adculos%20el%c3%a9tricos%20aspectos%20b%c3%a1sicos%2c%20perspectivas\\_P.pdf](https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/1764/2/BS%2032%20Ve%c3%adculos%20el%c3%a9tricos%20aspectos%20b%c3%a1sicos%2c%20perspectivas_P.pdf)>. Acesso em: 25 jul 2022.
- [51] B. S. M. C. Borba, "Modelagem integrada da introdução de veículos leves conectáveis à rede elétrica no sistema energético brasileiro," Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2012.
- [52] R. L. Carneiro, J. H. A. Molina, A. G. Magdalena, E. M. Pinto, "Aspectos essenciais das baterias chumbo-ácido e princípios físico-químicos e termodinâmicos do seu funcionamento," Rev. Virtual Quím., 9 (3), 889-911, 2017.
- [53] Husain, "Electric and Hybrid Vehicle: design fundamentals," Boca Raton: CRC Press LCC, pp. 270, 2003.
- [54] Bateria de Níquel - cádmio. Disponível em: <<https://mundoeducacao.bol.uol.com.br/quimica/bateria-niquel-cadmio.htm>>. Acesso em: 25 jul 2022.
- [55] Bateria de Íons de Lítio. Disponível em: <<https://www.infoescola.com/eletricidade/bateria-de-ions-de-litio/>>. Acesso em: 27 jul 2022.
- [56] Dinger, et al., "Batteries for electric cars: challenges, opportunities, and the outlook to 2020," BCG, 2010.

- [57] V. A. G. Osório, “Carregamento ótimo de veículos elétricos considerando as restrições das redes de distribuição de média tensão,” Universidade Estadual Paulista, 2013.
- [58] C. Guille, G. A. Gross, “A conceptual framework for the vehicle-to-grid (v2g) implementation,” *Energy policy*, Elsevier, v. 37, no 77, pp. 4379-4390, 2009. Pag. 25
- [59] K. Clement-Nyns, E. Haesen, J. Driesen, “The impact of charging plug-in hybrid electric vehicles on a residential distribution grid,” *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 25, no 1, pp. 371-380, 2010. Pag 21 e 26.
- [60] R. Li, Q. Wu, S. S. Oren, “Distribution locational marginal pricing for optimal electric vehicle charging management”, *IEEE Transactions on Power Systems*, IEEE, v. 29, n. 1, pp. 203-211, 2014.
- [61] M. A. Hannan and S. Member, “State-of-the-Art and Energy Management System of Lithium-Ion Batteries in Electric Vehicle Applications: Issues and Recommendations,” *IEEE Access*, v. 6, pp. 19362-19378, 2018.

## ANEXO I

<b>Nº de VE's Total</b>	200			<b>Pot base</b>															
<b>Nº de cada VE</b>	40			2500															
Veículos Eléctricos Utilizados					Quantidade de VE's utilizados (kW)			Quantidade de VE's utilizados (pu)											
Modelo	Tipo	Potência (kW)	Autonomia (km)		Modelos	100%	75%	50%	100%	75%	50%								
Kandi K27	Li-Ion	19,85	95		Kandi K27	794	595,5	397	0,3176	0,2382	0,1588								
Nissan Leaf	Li-Ion	109,59	364		Nissan Leaf	4383,6	3287,7	2191,8	1,75344	1,31508	0,87672								
Toyota Prius Prime	Li-Ion	98,55	40		Toyota Prius Prime	3942	2956,5	1971	1,5768	1,1826	0,7884								
Mini Cooper SE	Li-Ion	135,33	177		Mini Cooper SE	5413,2	4059,9	2706,6	2,16528	1,62396	1,08264								
BMW i3	Li-Ion	125,03	322		BMW i3	5001,2	3750,9	2500,6	2,00048	1,50036	1,00024								
					<b>Total</b>	<b>19534</b>	<b>14650,5</b>	<b>9767</b>	<b>7,8136</b>	<b>5,8602</b>	<b>3,9068</b>								
					<b>Por 48</b>				<b>0,16278</b>	<b>0,1220875</b>	<b>0,0813917</b>								