

**UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS - UNISINOS**  
**UNIDADE ACADÊMICA DE GRADUAÇÃO**  
**CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**CÁSSIO MIGUEL PORSCHE**

**AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS DA INSERÇÃO DE VEÍCULOS ELÉTRICOS EM**  
**REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

**São Leopoldo**  
**2018**

CÁSSIO MIGUEL PORSCHE

**AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS DA INSERÇÃO DE VEÍCULOS ELÉTRICOS EM  
REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado como requisito parcial para  
obtenção do título de Bacharel em  
Engenharia Elétrica, pelo Curso de  
Engenharia Elétrica da Universidade do  
Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS

Orientador: Prof. Dr. Paulo Ricardo da Silva Pereira

São Leopoldo

2018

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus, por sempre guiar e iluminar o meu caminho.

À minha noiva e companheira, Priscilla, que durante toda a graduação esteve ao meu lado e sem medir esforços me ajudou durante todos os momentos de dificuldades para que fosse possível chegar neste momento.

À minha avó, Maria, que foi a base dos meus ensinamentos e responsável pela pessoa que me tornei hoje.

Ao meu padrinho, Claudemir, que desde o início do curso acreditou no meu potencial e me orientou a seguir firme e forte em busca do meu sonho.

A minha mãe, Nelci, minha irmã, Ana, e toda a minha família, pela base e suporte essencial que me deram durante esta longa caminhada.

Aos meus colegas de trabalho, que sempre estiveram dispostos a ajudar nas atividades e pela compreensão nos momentos de provas e trabalhos.

A todos os meus amigos, em especial ao Marco, Marcos e Thiago, pela parceria ao longo deste curso. Aos demais, pela paciência e compreensão pela minha ausência durante os fins de semana.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Paulo Ricardo da Silva Pereira, por aceitar a proposta deste estudo e por todo o suporte prestado durante o desenvolvimento deste trabalho.

A todos os professores e funcionários da Universidade, pelos conhecimentos e experiências compartilhadas para minha formação acadêmica e profissional.

*“O importante em relação a um problema não é a sua solução,  
mas a força que ganhamos ao encontrar a solução.”*

*Anônimo*

## RESUMO

Os veículos elétricos vêm ganhando espaço nas ruas com o intuito de minimizar os impactos ao meio ambiente, através da redução da emissão de gases poluentes pelos combustíveis fósseis e diminuição da poluição sonora. Por outro lado, com a inserção da frota destes veículos haverá o aumento na demanda de energia elétrica do sistema, que deve ser avaliado para evitar futuros problemas na rede elétrica. O presente trabalho tem como objetivo a avaliação dos impactos da inserção de veículos elétricos na rede de distribuição de energia elétrica. Foram criados três cenários diferentes para análise do comportamento do sistema, sendo demonstrados e comparados os resultados de nível de tensão, carregamento, fator de potência, perdas técnicas e potência ativa demandada com os valores estabelecidos pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Com relação ao nível de tensão, pode-se observar o aumento no número de transgressões de tensão e os locais onde elas ocorrem com a inserção dos VEs. Para o carregamento, avaliou-se o condutor com maior circulação de corrente, porém neste estudo não houve nenhum ponto com sobrecarga no sistema. Observou-se que o fator de potência tem um maior impacto com a inserção dos veículos elétricos operando como geradores distribuídos e que as perdas técnicas aumentam à medida que são inseridos os VEs, devido ao acréscimo de carga na rede. Através dos resultados obtidos, pode-se avaliar os pontos que necessitam de adequações e futuros investimentos, a fim de manter o bom funcionamento da rede elétrica.

**Palavras-chave:** Veículos elétricos, Geração distribuída, Rede de distribuição, *OpenDSS*, ANEEL.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Evolução do Estoque Global de Carros Elétricos.....	17
Figura 2 - Diagrama Conceitual de Frenagem Regenerativa .....	23
Figura 3 - Ciclo de Condução Urbana e Auto-Estrada .....	24
Figura 4 - Postos de Carregamento de VEs em Vias Públicas .....	26
Figura 5 - Comparativo entre os Horários de Utilização na Modalidade Tarifária - Tarifa Branca.....	35
Figura 6 - Vendas Globais Anuais de Veículos Leves.....	36
Figura 7 - Fluxograma da metodologia adotada.....	43
Figura 8 - Sistema IEEE 123 Node Test Feeder.....	44
Figura 9 – Modelo $\pi$ .....	45
Figura 10 – Perfil de Consumidor Residencial até 500 kWh em Dia Útil.....	47
Figura 11 – Perfil de Consumidor Residencial até 500 kWh em Fim de Semana .....	48
Figura 12 – Perfil de Consumidor Residencial acima de 500 kWh em Dia Útil .....	49
Figura 13 – Perfil de Consumidor Residencial acima de 500 kWh em Fim de Semana .....	49
Figura 14 – Perfil de Consumidor Comercial em Dia Útil .....	50
Figura 15 – Perfil de Consumidor Comercial em Fim de Semana.....	50
Figura 16 – Perfil de Consumidor Industrial em Dia Útil.....	51
Figura 17 – Perfil de Consumidor Industrial em Fim de Semana .....	51
Figura 18 – Divisão das Classes Consumidoras por Blocos .....	52
Figura 19 – Novo Nissan Leaf .....	54
Figura 20 – Perfil de Carga de Veículos Elétricos .....	56
Figura 21 – Veículo Elétrico como Geração Distribuída .....	57
Figura 22 – Interface para coleta e organização dos dados.....	58
Figura 23 – Fases mais críticas do sistema em dia útil .....	60
Figura 24 – Fases mais críticas do sistema em fim de semana .....	61
Figura 25 – Nível de tensão da fase A da Barra 151 para dia útil .....	62
Figura 26 – Nível de tensão da fase A da Barra 151 para fim de semana .....	63
Figura 27 – Nível de tensão da fase B da Barra 50 para dia útil .....	64
Figura 28 – Nível de tensão da fase B da Barra 95 para fim de semana .....	64
Figura 29 – Nível de tensão da fase C da Barra 66 para dia útil .....	65
Figura 30 – Nível de tensão da fase C da Barra 66 para fim de semana.....	66

Figura 31 – Perfil de tensão da fase A da Barra 151 para dia útil .....	67
Figura 32 – Perfil de tensão da fase B da Barra 50 para dia útil .....	68
Figura 33 – Perfil de tensão da fase C da Barra 66 para dia útil .....	69
Figura 34 – Perfil de tensão da fase A da Barra 151 para fim de semana .....	69
Figura 35 – Perfil de tensão da fase B da Barra 95 para fim de semana .....	70
Figura 36 – Perfil de tensão da fase C da Barra 66 para fim de semana .....	71
Figura 37 – Transgressão Precária em Dia Útil.....	72
Figura 38 – Transgressão Crítica em Dia Útil.....	72
Figura 39 – Transgressões Precárias e Críticas em Dias Úteis .....	73
Figura 40 – Transgressão Precária em Fim de Semana .....	74
Figura 41 – Transgressão Crítica em Fim de Semana.....	75
Figura 42 – Transgressões Precárias e Críticas em Fim de Semana .....	75
Figura 43 – Corrente da Fase A da Linha 115 em Dia Útil.....	77
Figura 44 – Corrente da Fase B da Linha 115 em Dia Útil.....	78
Figura 45 – Corrente da Fase C da Linha 115 em Dia Útil.....	78
Figura 46 – Corrente da Fase A da Linha 115 em Fim de Semana .....	79
Figura 47 – Corrente da Fase B da Linha 115 em Fim de Semana .....	80
Figura 48 – Corrente da Fase C da Linha 115 em Fim de Semana .....	80
Figura 49 – Fator de Potência em Dia Útil .....	82
Figura 50 – Fator de Potência em Fim de Semana.....	83
Figura 51 – Perdas Técnicas em Dia Útil no Horário de Ponta .....	84
Figura 52 – Percentual de Perdas Técnicas em Dia Útil no Horário de Ponta .....	85
Figura 53 – Perdas Técnicas em Fim de Semana no Horário de Ponta .....	86
Figura 54 – Percentual de Perdas Técnicas em Fim de Semana no Horário de Ponta .....	86
Figura 55 – Potência Ativa Demandada em Dia Útil .....	87
Figura 56 – Potência Ativa Demandada em Fim de Semana.....	88
Figura 57 – Carregamento do Transformador em Dia Útil .....	89
Figura 58 – Carregamento do Transformador em Fim de Semana .....	90

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Unidades Consumidoras por Classes de Consumo .....	31
Quadro 2 - Unidades Consumidoras por Tipo .....	31
Quadro 3 - Patamares de Carga .....	34
Quadro 4 – Configuração das Linhas Aéreas.....	46
Quadro 5 – Configuração das Linhas Subterrâneas .....	46
Quadro 6 – Modelo de Cargas .....	52
Quadro 7 – Potências Ativa e Reativa por Classes de Consumo.....	53
Quadro 8 – Quantidade de Consumidores .....	53
Quadro 9 – Quantidade de Consumidores com Veículos Elétricos.....	55
Quadro 10 – Quantidade de Consumidores com Geração Distribuída .....	57
Quadro 11 – Classificação da Tensão de Atendimento .....	60
Quadro 12 – Condutor Linnet – Conforme NBR 7270.....	76



## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 - Atributos do Equipamento de Alimentação dos VEs .....	25
Tabela 2 – Distribuição das Cargas conforme os Perfis de Consumo Definidos .....	99
Tabela 3 – Identificação dos Veículos Elétricos no Sistema .....	102
Tabela 4 – Identificação das Gerações Distribuídas no Sistema .....	103

## LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABVE	Associação Brasileira do Veículo Elétrico
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
EPRI	<i>Electric Power Research Institute</i>
GD	Geração Distribuída
INEE	Instituto Nacional de Eficiência Energética
NBR	Normas Brasileiras de Regulação
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
OpenDSS	<i>Open Distribution System Simulator</i>
PRODIST	Procedimento de Distribuição
QEE	Qualidade de Energia Elétrica
RED	Recursos Energéticos Distribuídos
RN	Regularização Normativa
UC	Unidade Consumidora
V2G	<i>Vehicle to Grid</i>
VB	<i>Visual Basic</i>
VCI	Veículos a Combustão Interna
VE	Veículos Elétricos

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>13</b>
<b>1.1 Motivação</b> .....	<b>14</b>
<b>1.2 Problema</b> .....	<b>14</b>
<b>1.3 Objetivos</b> .....	<b>15</b>
1.3.1 Objetivo Geral .....	15
1.3.2 Objetivos Específicos .....	15
<b>1.4 Justificativa</b> .....	<b>15</b>
<b>1.5 Estrutura do Trabalho</b> .....	<b>16</b>
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	<b>17</b>
<b>2.1 Veículos Elétricos</b> .....	<b>17</b>
2.1.1 Veículos Puramente Elétricos .....	19
2.1.2 Veículos Elétricos Híbridos e Plug-In .....	20
2.1.3 Frenagem Regenerativa .....	22
2.1.4 Abastecimento (Recarga) .....	24
2.1.5 Manutenção.....	27
<b>2.2 Projeção de Inserção de Veículos Elétricos no Brasil</b> .....	<b>28</b>
<b>2.3 Análises e Impactos de Recursos Energéticos Distribuídos</b> .....	<b>30</b>
2.3.1 Qualidade de Energia.....	32
2.3.2 Níveis de Carregamento.....	33
2.3.3 Demanda e Consumo.....	35
2.3.4 Planejamento .....	36
2.3.5 Operação.....	37
<b>2.4 Trabalhos Relacionados</b> .....	<b>38</b>
<b>3 METODOLOGIA</b> .....	<b>41</b>
<b>4 ESTUDO DE CASO</b> .....	<b>44</b>
<b>4.1 Rede de Estudo e suas Características</b> .....	<b>44</b>
4.1.1 Linhas.....	45
4.1.2 Cargas.....	47
4.1.3 Consumidores .....	53
4.1.4 Penetração de Veículos Elétricos.....	54
4.1.5 Utilização dos Veículos Elétricos como Geração Distribuída .....	56
<b>4.2 Simulação</b> .....	<b>58</b>

4.2.1 Primeiro Cenário – Rede IEEE sem VEs.....	59
4.2.2 Segundo Cenário – Rede IEEE com VEs.....	59
4.2.3 Terceiro Cenário – Rede IEEE com VEs e GD .....	59
<b>4.3 Análise dos Resultados .....</b>	<b>59</b>
4.3.1 Níveis de Tensão .....	60
4.3.2 Carregamento .....	76
4.3.3 Fator de Potência .....	81
4.3.4 Perdas Técnicas.....	83
4.3.5 Potência .....	87
<b>5 CONCLUSÕES .....</b>	<b>91</b>
<b>5.1 Sugestões para Trabalhos Futuros .....</b>	<b>92</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>93</b>
<b>ANEXO A – CARGAS ORIGINAIS DO SISTEMA.....</b>	<b>99</b>
<b>ANEXO B – VEÍCULOS ELÉTRICOS DO SISTEMA .....</b>	<b>102</b>
<b>ANEXO C – GERAÇÕES DISTRIBUÍDAS DO SISTEMA.....</b>	<b>103</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O interesse e estudo sobre os veículos elétricos não começaram recentemente na indústria, muito pelo contrário, no século XIX já existiam alguns protótipos de veículos elétricos, como uma charrete fabricada pelo inventor Charles Jeantaud em 1881, por exemplo. (RODRIGUES, 2011).

Depois da década de 1880 os veículos elétricos tiveram uma evolução tecnológica em relação às baterias, como as baterias de níquel-ferro criadas em 1901 por Thomas Edison, o que fez com que a capacidade de armazenamento de carga aumentasse em 40%. (BARAN E LEGY, 2010).

Ainda segundo BARAN E LEGY (2010), houve avanços significativos para melhorar o desempenho dos carros elétricos, como a frenagem regenerativa, responsável por transformar energia cinética do automóvel quando está em movimento, e também o sistema híbrido, que possibilita o veículo a se movimentar a gasolina e eletricidade. Contudo, enquanto as tecnologias para o desenvolvimento do carro elétrico eram criadas, também surgiam os motores de combustão interna.

No ano de 1912 em Nova York, os carros elétricos atingiram um número de 30 mil unidades em circulação, mas a frota de carros movidos a combustão interna era 30 vezes maior, e foi a partir desse ano que a produção e investimentos de carros elétricos entrou em declínio. (BARAN E LEGY, 2010).

Muitos foram os motivos pelos quais os veículos elétricos perderam espaço, sendo o principal relacionado ao preço final dos veículos a gasolina, que com o sistema de produção em série desenvolvido por Henry Ford, custavam de US\$ 500 a US\$ 1.000, ou seja, metade do preço desembolsado para adquirir um modelo elétrico. O que contribuiu foram as descobertas de petróleo que possibilitaram a redução do preço da gasolina, tornando-a a melhor opção para o setor de transportes. (BARAN E LEGY, 2010).

Segundo os autores, os veículos a combustão interna se tornaram mais populares e tiveram mais espaço na indústria automotiva, deixando os estudos dos elétricos em segundo plano até a década de 90, quando a Toyota lançou o Prius.

## 1.1 Motivação

O que fez com que os veículos elétricos ganhassem espaço novamente? Um dos principais motivos está relacionado à diminuição do impacto que um veículo a combustão interna provoca no ambiente, tanto a poluição atmosférica, como a sonora. (INMAN, 2018).

De acordo com o artigo publicado no blog INMAN (2018), o impacto que um veículo movido a eletricidade tem na atmosfera é muito menor, comparado a um veículo a combustão interna. Além desse fator, o veículo elétrico tem um papel fundamental na diminuição da poluição sonora, já que a utilização da eletricidade reduz os níveis de ruídos.

Um dos fatores que mais agrava a poluição do planeta é a quantidade de gases liberados pelos escapamentos dos veículos a combustão interna, pois segundo a matéria publicada no G1 (2011), os automóveis são responsáveis por 90% da poluição do ar. Além de poluir o meio ambiente, esses gases são responsáveis por uma série de doenças respiratórias, do sistema nervoso e até doenças cardiovasculares.

Mas a inclusão destes veículos, que tanto ajudam na mitigação da poluição atmosférica, implica em alguns pontos a serem verificados, como o impacto que essa inserção terá nos sistemas de distribuição de energia nas cidades. (SIMON, 2013).

## 1.2 Problema

Muitos são os benefícios da inclusão dos veículos elétricos na frota mundial, sendo o principal a diminuição do impacto ambiental que os veículos à combustão interna causam na atmosfera com a emissão de gases poluentes pela utilização de combustíveis fósseis. (INMAN, 2018).

Mas é necessário olhar esse aumento da frota de veículos elétricos com outras perspectivas também, ou seja, não podemos esquecer que haverá um aumento de consumo de energia elétrica por parte destes veículos, um aumento que não estava previsto quando as redes de distribuição foram criadas. (SIMON, 2013).

Ainda segundo SIMON (2013), por mais que os veículos elétricos sejam recarregados à noite, o consumo em massa em um mesmo período pode gerar sobrecargas nos sistemas elétricos, onde serão necessárias algumas adequações

para suprir essa carga, tornando este um dos principais aspectos que requer atenção das distribuidoras de energia elétrica.

### **1.3 Objetivos**

#### **1.3.1 Objetivo Geral**

Com base no conteúdo abordado nos tópicos anteriores, este trabalho tem como principal objetivo avaliar os impactos na qualidade de energia com a inserção de veículos elétricos em redes de distribuição de energia elétrica.

#### **1.3.2 Objetivos Específicos**

Além da avaliação de impacto da inserção dos veículos elétricos nas redes de distribuição, este trabalho visa atingir alguns objetivos secundários, que servirão para estruturar o contexto abordado, listados a seguir:

- a) Avaliar o impacto na qualidade de energia de acordo com o perfil de carga dos veículos elétricos;
- b) Avaliar a capacidade energética de um veículo elétrico para uma carga completa (kWh);
- c) Identificar os impactos em diferentes cenários de acordo com a distribuição adotada de blocos de consumidores;
- d) Avaliar o comportamento da rede de distribuição, com a inserção de veículos elétricos atuando como geração distribuída.

### **1.4 Justificativa**

Alguns dos obstáculos a serem vencidos pelos veículos elétricos para conquistarem espaço significativo na frota brasileira já têm algumas previsões de solução, como a autonomia das baterias, que tende a melhorar com a evolução tecnológica perpetuada em torno do assunto. (SIMON, 2013).

Logo que começamos a falar sobre veículos elétricos, o principal desafio para as fabricantes seria deixar estes veículos acessíveis à população, ou seja, o preço final de aquisição dos veículos elétricos deveria ser atrativo suficiente para um

condutor optar por ele, e este risco está relacionado ao preço investido nas baterias, que, com a inovação tecnológica e produção em massa, tende a ser fortemente reduzido. (SIMON, 2013).

O que realmente preocupa atualmente em relação aos veículos elétricos, conforme SIMON (2013), é a recarga dos mesmos, que apesar de ocorrerem à noite, quando os condutores retornarem para suas residências, podem gerar sobrecargas nos sistemas elétricos, que irão necessitar de investimentos para sanar essa dificuldade.

## **1.5 Estrutura do Trabalho**

Este trabalho está estruturado com uma breve introdução ao tema apresentado, bem como os motivadores da escolha desse tema e justificativa para desenvolvimento do mesmo. Junto a estes tópicos, também são abordados o objetivo geral e os objetivos específicos estabelecidos para este trabalho.

Além dos tópicos citados acima, que visam explicar o intuito deste artigo de forma sucinta, o mesmo está estruturado com alguns outros que exploram mais a fundo o assunto escolhido, sendo eles: veículos elétricos, subdividido em veículos puramente elétricos, veículos híbridos e plug-ins, frenagem regenerativa, abastecimento e recarga, e por fim manutenção; projeção de inserção de veículos elétricos no Brasil; análises e impactos de recursos energéticos distribuídos, subdividido em qualidade de energia, níveis de carregamento, demanda e consumo, planejamento e operação; trabalhos relacionados, onde são abordados trabalhos referentes ao tema escolhido, explorando as semelhanças e diferenças com o presente trabalho; metodologia, que explora como os objetivos geral e específicos serão atingidos; estudo de caso, que contextualiza o estudo realizado neste trabalho, subdividido em tópicos como rede de estudos e suas características – subdividido em linhas, cargas, penetração de veículos elétricos e utilização de veículos elétricos como geração distribuída – simulação, análise dos resultados – subdividido em níveis de tensão, carregamento, fator de potência, perdas técnicas e potência; e, finalmente, as conclusões e sugestões para trabalhos futuros relacionados ao tema.



## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 Veículos Elétricos

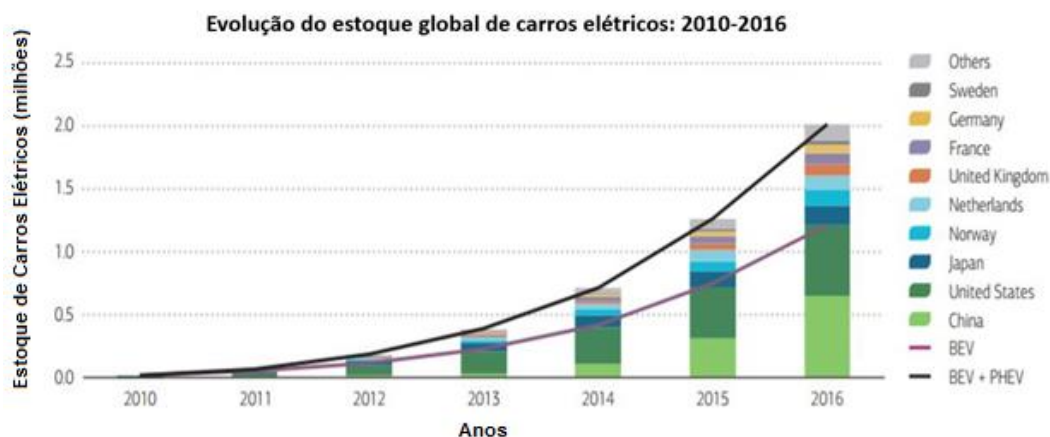
Os veículos elétricos (VEs), aqueles com base em energias renováveis, estão sendo produzidos e popularizados em grandes potências mundiais, como França, Estados Unidos, China, entre outros, com o objetivo de revolucionar o setor de transportes, reduzindo a emissão de gases poluentes e os efeitos do aquecimento global. (SILVA, 2017).

Novas tecnologias estão surgindo no ramo automobilístico e diversas montadoras anunciaram que veículos a combustão interna (VCI) já não serão mais produzidos dentro de alguns anos. (QUINTANILHA, 2017).

Segundo ALVES (2017), essa mudança traz inúmeras vantagens no que diz respeito à eficiência energética, onde um carro baseado em energia renovável ultrapassa 80%, quando comparada com 15% a 20% de um carro movido a combustíveis fósseis.

Ainda segundo o autor, o crescimento da frota de veículos elétricos está acelerado no cenário mundial, mas ainda pequeno frente à frota total de veículos produzidos. Essa afirmação está representada na Figura 1, onde podemos observar que em 2010 havia poucas unidades de VEs nas ruas, mas em 2016 esse número subiu para 2 milhões, distribuídos principalmente na China, Estados Unidos, Japão, Noruega e Holanda.

Figura 1 - Evolução do Estoque Global de Carros Elétricos



Fonte: Adaptado de Global EV Outlook, IEA (2017).

Já em 2018, a frota mundial de veículos elétricos chegou a 3,2 milhões, representando um aumento de 55% em relação ao ano anterior. Esse crescimento foi impulsionado pela China, onde cerca de 1,2 milhões de veículos movidos a energia elétrica já circulam pelo país (WELLE, 2018).

Além dos fatores econômicos e de performance, esse avanço da tecnologia dos veículos elétricos está relacionado também a fatores ambientais, como a diminuição do impacto causado pela emissão dos combustíveis fósseis na atmosfera e o cumprimento do acordo de Paris, que visa manter o aumento da temperatura média global abaixo dos 2 °C (PLUMER, 2017).

Também conforme o autor, a Agência Internacional de Energia projeta que 40% dos veículos comercializados em 2040 devem ser elétricos.

Segundo a ABB (2018), com o aumento da frota, os postos de abastecimento também crescerão de forma proporcional. Serão necessários em torno de 1,5 pontos de carregamento por veículo elétrico, considerando carregadores de 7 kW, devido ao tempo de recarga de cada veículo, que é de aproximadamente 5 horas.

A ABB (2018) acredita que existirão muitas formas de carregamento dos veículos elétricos, não gerando mudanças significativas para os consumidores. As diversas formas de carregamento permitirão que concessionárias e consumidores negociem maneiras de armazenar energia, auxiliando na demanda da rede.

Mas, para COSTA (2013), é preciso cautela e muito planejamento para substituição de toda frota de veículos a combustão por veículos elétricos, isto porque a demanda de energia elétrica necessária para alimentar o cenário de 100% VEs, no Brasil, é equivalente a três hidrelétricas como a de Itaipu, o que representa um acréscimo de aproximadamente 190.000 GWh (gigawatt-hora) por ano na produção de energia.

Segundo DELGADO et al. (2017), o processo de evolução está acontecendo cada vez mais rápido, sendo possível notar a melhora na eficiência dos veículos a combustão de hoje comparados com os de antigamente. Com isso, o objetivo é tornar todos os veículos a combustão interna em veículos elétricos, e a tecnologia está caminhando para isso.

Ainda segundo os autores, o que está sendo explorado é a maneira de tornar os VEs híbridos, existentes hoje em maior número, em veículos puramente elétricos, sem a necessidade de adição de combustíveis fósseis. (DELGADO et al., 2017).

Estes veículos podem ser configurados de diferentes formas. O automóvel Prius da marca Toyota, por exemplo, possui um motor centralizado, que tem a função similar de um motor a combustão interna (MCI), enquanto o i Miev, da Mitsubishi, tem motores junto às rodas, diminuindo as perdas de transmissão, melhorando o desempenho e eficiência do veículo. (CASTRO E FERREIRA, 2010).

### 2.1.1 Veículos Puramente Elétricos

Os veículos puramente elétricos são aqueles que possuem apenas um motor, que utiliza eletricidade como fonte de energia. A energia necessária para alimentação deste motor e propulsão das rodas pode ser proveniente de células de combustível, energia solar, rede aérea e baterias químicas. (CASTRO E FERREIRA, 2010).

Em artigo para a revista Oficina da Net, foi explicado o funcionamento de um motor elétrico:

Com o funcionamento através do propulsor elétrico, o modelo de veículos com motores elétricos utiliza energia química que ficam localizadas nas baterias recarregáveis, que é convertido em energia elétrica, que por sua vez, converterá em energia mecânica, possibilitando a movimentação do veículo. Seu motor pode ser à 220V e bem mais silencioso que o motor à combustão. O funcionamento deste tipo de veículo é feito através de um regulador que passa a quantidade correta de energia das baterias ao motor; com base na tecnologia dos dois potenciômetros que ficam ligados ao pedal do acelerador (RODRIGUES, 2016).

Segundo CASTRO E FERREIRA (2010), o modelo de veículos elétricos mais adotado pelas montadoras são os movidos a bateria (VEBs) por possuírem uma maior eficiência energética e um menor custo de manutenção e operação.

Outra vantagem na utilização de veículos puramente elétricos seria a redução de pontos emissores de poluentes, concentrado apenas em fontes de energia, ao contrário do cenário atual, que ocorre nos diversos pontos de consumo. (BARAN E LEGEY, 2010).

Segundo o presidente da ABVE, GUGGISBERG (2017), apesar das vantagens da utilização de veículos elétricos girarem em torno da diminuição da poluição, tanto sonora quanto atmosférica, os veículos elétricos enfrentam problemas relacionados ao preço final dos mesmos, que é muito elevado.

Ainda de acordo com GUGGISBERG (2017) no caso dos veículos puramente elétricos, o preço é ainda maior, devido à bateria utilizada, mas isso pode ser mitigado conforme a escala de fabricação, que pode diminuir esse valor.

Além destes fatores, a autonomia das baterias dos veículos puramente elétricos também é um ponto de atenção. Ao contrário dos híbridos, os puramente elétricos não possuem uma alternativa movida a combustível para seu deslocamento (GUGGISBERG, 2017). Segundo o presidente da ABVE, os estudos para sanar esse ponto têm se intensificado cada vez mais e, com isso, a cada dois meses surgem novas tecnologias visando mitigar o problema das baterias elétricas.

O BMW i3, por exemplo, possui a tecnologia das baterias de íons de lítio, que é de alta tensão desenvolvida para proporcionar uma melhor eficiência energética. Com isso e com seu sistema de tração, a autonomia da bateria deste veículo puramente elétrico é de 160 km, que ainda possui um extensor que possibilita o aumento dessa autonomia para 300 km. (BMW, 2013).

### 2.1.2 Veículos Elétricos Híbridos e Plug-In

De acordo com BARAN E LEGEY (2010) os veículos híbridos surgiram com o objetivo de suprir as necessidades dos veículos puramente elétricos no que diz respeito à eficiência das baterias e estrutura de distribuição de energia elétrica do século XX.

Esta tecnologia empregada nos veículos pode ser tratada como um processo de transição entre os combustíveis fósseis e a eletricidade, uma maneira de mostrar a eficiência destes automóveis e ao mesmo tempo conscientizar as pessoas sobre as melhorias ao meio ambiente, mantendo o conforto e bem-estar ao dirigir um veículo híbrido. (BARAN E LEGEY, 2010).

Os veículos híbridos são constituídos por pelo menos um motor elétrico, uma bateria recarregável e um motor a combustão interna com um gerador, e tem o propósito de melhorar a eficiência energética do veículo. Com a utilização de motores elétricos, a alternância da operação é reduzida, elevando assim a eficiência do sistema e em paradas o motor do veículo é desligado, enquanto motores a combustão interna continuam ligados. Além destes fatores, destaca-se a melhoria na transmissão, sendo possíveis inúmeras combinações, por se tratar de um sistema eletrônico. (RASKIN E SHAH, 2006).

No que diz respeito à sustentabilidade, um automóvel híbrido em baixas velocidades reduz em até 40% a emissão de CO<sub>2</sub> quando comparado a um veículo somente a combustão, de mesmo porte e potência. Um exemplo disto é o Toyota Prius, que além de ser ambientalmente adequado, traz uma maior economia para o proprietário em rodagens pela cidade, fazendo 18,9 km/l, isto devido a utilização apenas do motor elétrico na maior parte do tempo. (TOYOTA, 2018).

Outro ponto a ser ressaltado sobre o Toyota Prius é o fato de não ser necessária a ligação do veículo na tomada para recarga das baterias. Esta ocorre através do motor a combustão e também através da tecnologia de frenagem regenerativa, que será abordada no decorrer deste trabalho. (TOYOTA, 2018).

Dentro da categoria dos veículos híbridos, existem dois principais tipos de associações entre motor e gerador, em série e paralelo. BASSO (2011), define essas formas de transmissão como:

No híbrido série, a tração mecânica fica a cargo do motor elétrico. A energia necessária para alimentá-lo é fornecida por um conversor que recebe energia do gerador e/ou da bateria. Para manter a carga do motor à combustão constante, há um gerenciamento do fluxo de potência gerado [...]. No híbrido paralelo, a tração mecânica é feita tanto pelo motor elétrico, como pelo motor a combustão. É uma combinação das duas formas de tração do híbrido série e, da mesma forma, aproveita a energia cinética para recarregar a bateria.

De acordo com SIMON (2013), a configuração em série dos híbridos requer um conjunto de baterias maior do que a configuração paralela, em contrapartida, o motor da configuração paralela é mais caro. Atualmente temos o Chevrolet Volt como um exemplo de aplicação da configuração em série, e o Honda Civic empregando a paralela, que é encontrada na maioria dos veículos híbridos comercializados hoje.

Os híbridos ainda possuem a categoria de veículos híbridos plug-in, que são caracterizados por possuírem a possibilidade de serem carregados por uma fonte externa, conectado em uma tomada, característica herdada dos veículos elétricos a bateria. Além do carregamento por fonte externa, os híbridos plug-in possuem as características do modelo híbrido, podendo ser carregados pelo motor gerador (BASSO, 2011).

### 2.1.3 Frenagem Regenerativa

Em rodagens pela cidade, o sistema de frenagem é bastante utilizado, sendo necessárias inúmeras paradas devido a lombadas, semáforos, etc. A fim de melhorar a autonomia e eficiência de um veículo, alternativas de armazenamento de energia surgem e com isso otimizam o desempenho das baterias, como no caso da frenagem regenerativa. (PAREDES, POMILIO E MASTELARI, 2012).

Conforme ROCHA, ALBERTON E OLIVEIRA (2014), o freio regenerativo é definido por:

Um freio regenerativo é um mecanismo de recuperação de energia que produz um contra torque no eixo da máquina elétrica (motor) que causa a diminuição da velocidade de um veículo, convertendo a sua energia cinética em uma outra forma, geralmente em energia elétrica, que é realimentada de volta para a fonte que originalmente a forneceu.

Presente tanto em veículos puramente elétricos quanto em veículos híbridos, a frenagem regenerativa possui um papel fundamental para melhoria da eficiência de um automóvel, pois a energia cinética dispendida na frenagem do motor é convertida em energia elétrica e utilizada para outros fins. (BENES, 2014).

Quando o freio é acionado, o motor elétrico funciona como um gerador e a energia que seria desperdiçada na frenagem é reaproveitada e pode ser armazenada em bancos de baterias, ultra capacitores, etc. (BENES, 2014). Além desta forma de reaproveitar a energia, o autor cita a possibilidade de devolução à rede elétrica, podendo assim compensar na conta de energia.

Segundo SANTOS (2009), a combinação entre a frenagem mecânica (por atrito) com a frenagem elétrica, além de melhorar a eficiência do automóvel, reduz o desgaste das pastilhas de freios e eleva a vida útil do sistema de frenagem.

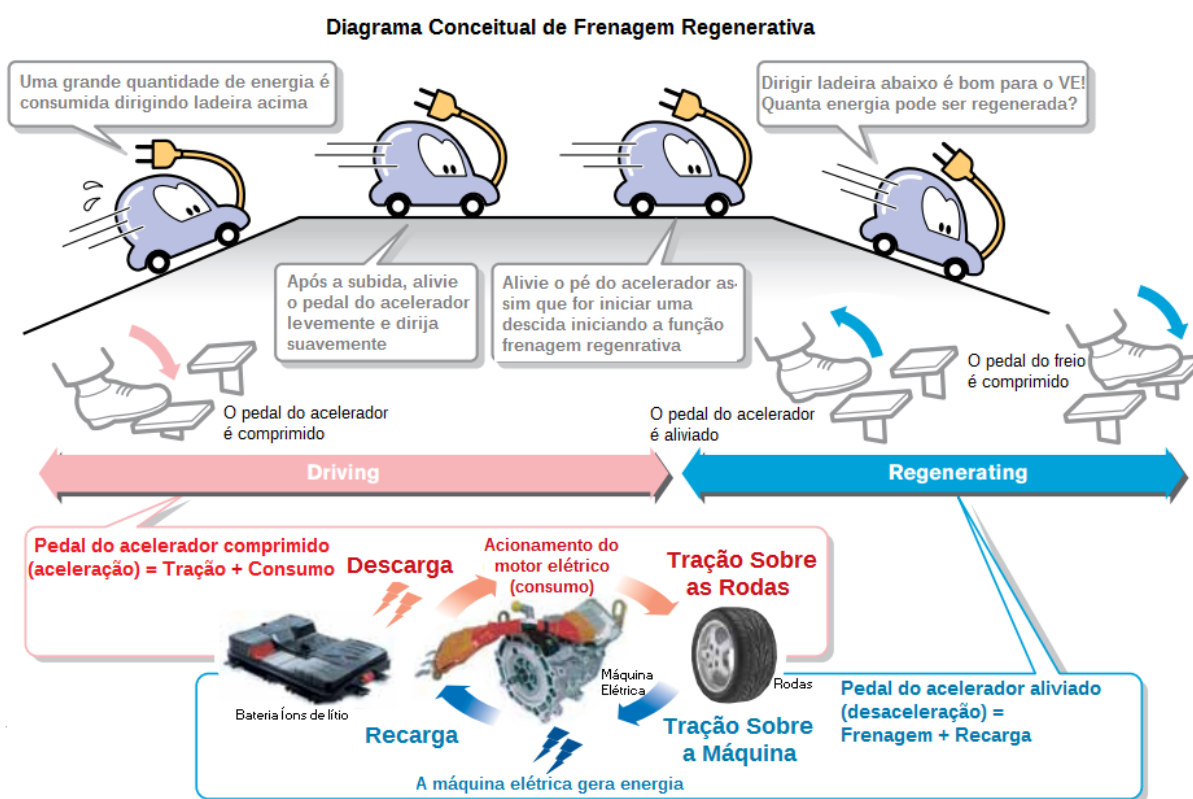
Conforme ROCHA, ALBERTON E OLIVEIRA (2014), existem duas formas de utilização da energia regenerada provida da frenagem, uma delas é o compartilhamento desta energia, ou seja, outros veículos ligados à mesma fonte de energia podem aproveitar o momento de frenagem para utilizar em momentos de aceleração, por exemplo; outra forma seria abastecer os sistemas de armazenamento com a energia dispendida e utilizá-la em momentos requeridos.

A tecnologia deste tipo de frenagem surge com o intuito de otimizar os sistemas, melhorando a eficiência e reduzindo as perdas apresentadas pelos sistemas

mecânicos. A aplicação é ampla e já pode ser notada em trens elétricos, carros de fórmula 1, elevadores, veículos puramente elétricos e híbridos, entre outros. (ROCHA, ALBERTON E OLIVEIRA, 2014)

A Figura 2, onde é apresentado por LENZ (2013) o diagrama conceitual, ilustra de forma bem detalhada a aplicação do sistema de frenagem regenerativa em automóveis com motor elétrico.

Figura 2 - Diagrama Conceitual de Frenagem Regenerativa



Fonte: LENZ (2013).

No primeiro momento, durante a aceleração do veículo elétrico, o motor está no modo tracionado e consome energia para realizar o ato de subida. Em seguida, em vias planas, a aceleração é reduzida e o consumo se torna menor, até que no momento em que ocorre uma rampa de descida, o motor passa a trabalhar como um gerador e a energia é devolvida às baterias (fonte de alimentação), passando por circuitos eletrônicos de potências, responsáveis pela conversão de corrente alternada (CA) em corrente contínua (CC). LENZ (2013).

As perdas apresentadas pelo sistema de frenagem em veículo a combustão interna representam cerca de 5,8% do total demandado pelo automóvel. Levando isto

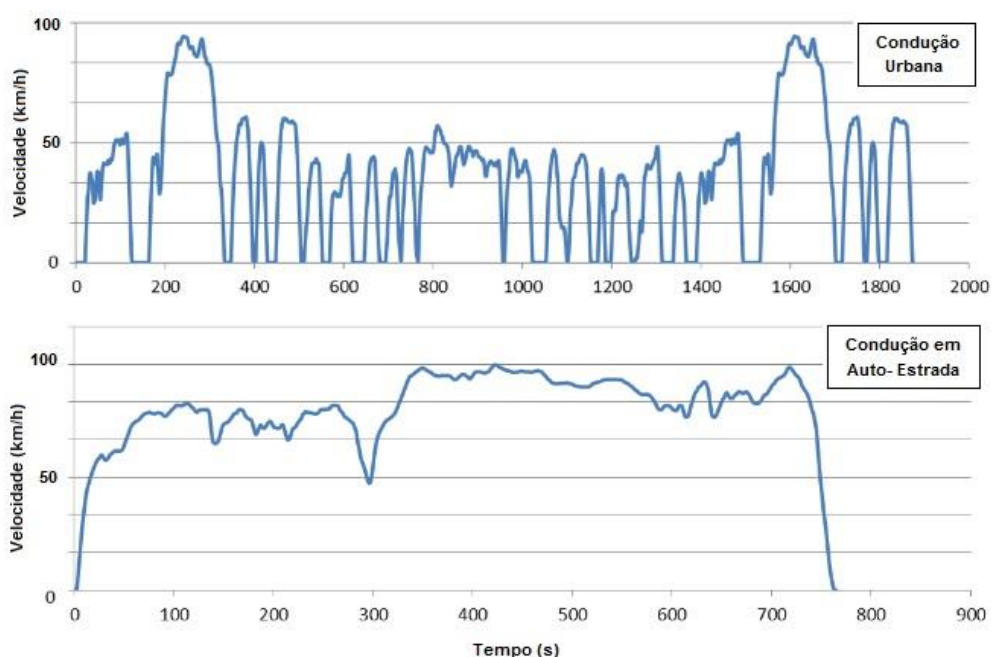
para o cenário de veículos elétricos, o reaproveitamento desta energia através da frenagem, faz com que a autonomia do veículo aumente e as recargas ao longo do dia sejam reduzidas. (CASTRO E FERREIRA, 2010).

#### 2.1.4 Abastecimento (Recarga)

Analisando o cenário de circulação de veículos puramente elétricos e veículos híbridos, as técnicas de reaproveitamento da energia se tornam fundamentais para se obter um maior rendimento e também prolongar a autonomia dos mesmos. (GOMES, 2010).

Com as diferentes formas de oscilações praticadas durante a condução dos veículos, representada pela Figura 3, faz-se necessária a gestão de energia, a fim de reduzir as quantidades de recargas ao longo do dia, diminuindo o impacto e a demanda no sistema elétrico. (GOMES, 2010)

Figura 3 - Ciclo de Condução Urbana e Auto-Estrada



Fonte: Adaptado de Nicolas (2013).

De acordo com CASTRO E FERREIRA (2010), o equipamento responsável pela alimentação dos veículos elétricos é dividido em níveis conforme a potência instalada. Na Tabela 1, pode-se visualizar os níveis através dos dados de alimentação do equipamento.



Ainda segundo o autor, os equipamentos de nível 1 vem sendo empregados em veículos híbridos por não demandarem tanto da fonte elétrica instalada no veículo. Já para veículos onde a utilização de energia elétrica é maior do que combustíveis fósseis para propulsão do motor, os equipamentos de nível 2 são os mais recomendados, pois o tempo de recarga reduz consideravelmente. Devido ao alto custo envolvido, os equipamentos de nível 3 são pouco utilizados, porém, estuda-se a utilização dos mesmos para que se tenha um tempo de recarga como os tradicionais veículos a combustão interna.

Tabela 1 - Atributos do Equipamento de Alimentação dos VEs

<b>Atributo</b>	<b>Nível I</b>	<b>Nível II</b>	<b>Nível III</b>
Tensão elétrica (V)	120	240	480
Corrente elétrica (Amps)	12-20	40	>100
Potência (kW)	1,44	3,3 a 6,6	50
Tempo de recarga de uma bateria de 24 kWh	16 horas	4 a 8 horas	30 minutos
Custo total (US\$)	833 a 878	1,5 a 2,1 mil	25 a 50 mil

Fonte: CASTRO E FERREIRA (2010).

Os VEs podem ser carregados de quatro formas: carregamento CC (nível 3), aplicado a estações de carga em vias públicas; carregamento indutivo (níveis 2 e 3), através da transferência de energia por campo magnético; carregamento condutivo (níveis 1 e 2), através da conexão direta entre metal-metal e/ou trocando as baterias. (FERNANDES, 2013).

De acordo com o autor, este último método, talvez o mais simples, apresenta vantagens como o carregamento rápido, similar aos VCIs, através da substituição das baterias descarregadas por novas. Porém, haveria um grande impacto ao meio ambiente com relação à quantidade de baterias em circulação e descarte das mesmas, e também seria necessário a padronização das baterias entre todos os fabricantes de veículos.

Investimentos em postos de carregamento, como o da Figura 4, ao longo das estradas públicas são necessários, para que a demanda nos horários de pico seja reduzida. Assim, os usuários ao invés de concentrarem a utilização da rede elétrica em momentos comuns em suas residências, terão a possibilidade de realizar o

carregamento durante as viagens ou até mesmo durante o horário de trabalho. (CASTRO E FERREIRA, 2010).

Figura 4 - Postos de Carregamento de VEs em Vias Públicas



Fonte: ABB (2017).

O sistema de carregamento do veículo integrado à rede elétrica permite um melhor gerenciamento da utilização de energia, sendo possível a devolução de energia armazenada nas baterias para a rede elétrica. Esta situação pode ser aplicada em faltas de energia ou até mesmo para compensação da conta de luz. (CASTRO E FERREIRA, 2010).

Ainda conforme o autor, para que essa integração seja possível, diversos estudos vêm sendo executados a fim de reduzir os custos das baterias, que representam 50% do custo total de um veículo elétrico.

E este é o grande empecilho encontrado atualmente, dificultando a entrada dos veículos elétricos e híbridos plug-in com maior rapidez no mundo. Mas de acordo com PLUMER (2017), até 2030 o valor destas baterias terá uma redução aproximada de 75%, sem a necessidade de grandes mudanças na tecnologia, apenas ampliando a escala de fabricação e melhorando as fórmulas químicas presentes nas mesmas.

Outro ponto que precisa de mais atenção segundo FONSECA (2009), é o fato de a bateria possuir pouco tempo de vida útil e não ser realizada a reciclagem da mesma, o que a torna extremamente agressiva ao meio ambiente. Como complemento, MIGLIACCI (2017) relata que 90% das baterias de lítio-íon pertencerão aos veículos elétricos em 2025 e a durabilidade delas varia de oito a dez anos, o que implica diretamente no custo de manutenção após este tempo.

### 2.1.5 Manutenção

Teremos uma grande evolução no cenário de manutenção de veículos elétricos. Com isso, os atuais profissionais e oficinas do ramo automobilístico precisarão se adaptar às novas tecnologias, uma vez que, ao invés de motores a combustão, haverá apenas motores elétricos nos veículos. (G1, 2015).

De acordo com o artigo publicado em O Carro Elétrico (2011), os veículos elétricos quando comparados a um veículo que utiliza combustíveis fósseis, apresentam grande simplificação de componentes em sua estrutura. Basicamente possuem um motor elétrico, este em CC ou CA, conversores, carregador de baterias e as baterias propriamente ditas.

Segundo o G1 (2015), em oficinas da Tesla já é possível notar uma grande redução nos equipamentos necessários para diagnóstico de falha em automóveis, ao invés de utilizar diversas ferramentas, limitam-se a apenas um notebook. O torque até então produzido por engrenagens complexas, passa a ser totalmente controlado por softwares.

As melhorias no sistema de armazenagem e geração de energia já são notáveis e o problema passa a ser o tempo de vida útil e o valor associado à utilização de baterias nos veículos elétricos. Devido a isso, a Tesla desenvolveu estudos de aplicação de baterias e reduziu o problema através da interligação de 7 mil pequenas baterias, responsáveis por aumentar a autonomia dos veículos para 400 quilômetros.

Com isso, o custo referente à manutenção das baterias pode ser reduzido, uma vez que, em ocorrência de dano, este pode ser isolado e reparado, sem a necessidade da substituição integral das baterias. (G1, 2015).

Com tantas inovações aplicadas aos veículos híbridos plug-in e veículos puramente elétricos, os períodos de manutenção serão mais afastados e o custo tende a diminuir em torno de 35%, quando comparado ao valor gasto na manutenção de veículos à combustão interna. (LENZ, 2012).

Contudo, LENZ (2012) explica que após um certo tempo, cerca de 8 a 10 anos, o custo da manutenção pode aumentar consideravelmente, devido à perda de eficiência das baterias, que terão de ser trocadas. Ainda segundo o autor, a venda destes veículos poderá ficar comprometida, se não houver investimentos na área de reciclagem e reutilização de baterias.

## 2.2 Projeção de Inserção de Veículos Elétricos no Brasil

A expansão dos veículos elétricos no mundo está cada vez mais em evidência e alguns países não estão medindo esforços de investimentos para a produção e popularização destes veículos, a fim de diminuir o impacto que os veículos movidos a combustão interna provocam no ambiente (SILVA, 2017).

Ainda segundo SILVA (2017), a França e o Reino Unido pretendem acabar com a produção de veículos que não sejam elétricos a partir de 2040, mas já em 2025, teremos a Noruega com produção zero de veículos movidos à combustão interna, segundo planejamento do governo norueguês.

Já o Brasil está um pouco atrás nesse planejamento por vários fatores e limitações. Dentre eles, o custo envolvido na produção dos carros elétricos é o mais significativo, como custo das baterias, recargas e manutenção e conseqüentemente, o preço final (PELEGI, 2017).

No Brasil, a importância dos carros chamados populares é notória. São estes, carros com um custo que varia entre 20.000 e 50.000 reais, compactos e geralmente com motores de baixa potência (HALLACK E VAZQUEZ, 2016). Ainda segundo os autores, os carros populares representam 71% da venda total de carros no Brasil.

Para HALLACK E VAZQUEZ (2016), de acordo com os dados apresentados anteriormente, é questionável o espaço que o país teria para a inserção dos veículos elétricos, tanto pela indústria automotiva, quanto para a elétrica.

Em contrapartida, é possível uma transformação significativa em ambas as indústrias para viabilizar essa inserção e popularização dos veículos elétricos no país. O primeiro passo para esse acontecimento foi um acordo que Brasil e Alemanha firmaram, para incentivar a nova tecnologia no país (HALLACK E VAZQUEZ, 2016).

Segundo o G1 (2016), trata-se de um projeto com duração de 4 anos, com investimento de 5 milhões de euros por parte da Alemanha. Ainda conforme dados do G1, o governo federal zerou o imposto de importação de veículos elétricos, para veículos de até 6 lugares e com motor a combustão até 3.0 litros.

Já de acordo com o PDE2026 (Plano Decenal de Expansão de Energia 2026) publicado pela EPE (Empresa de Pesquisa Energética), mesmo com o crescimento do mercado de automóveis elétricos, sua participação na demanda de eletricidade ainda é pequena, sendo apenas 0,3% em 2026.

Ainda segundo o PDE2026, no Brasil, há algumas limitações que sugerem uma expansão da demanda de veículos elétricos mais tardia, como o preço aquisitivo dos modelos fabricados hoje, por exemplo, ou a alternativa de utilização de biocombustíveis avançados, como o etanol de cana, que mitigaria um pouco o impacto dos combustíveis fósseis na atmosfera, que é o grande intuito deste planejamento publicado.

Com este cenário, a EPE projeta que a demanda de veículos continuará constituída por veículos com motores a combustão interna principalmente, podendo chegar a uma frota menor que 1% de veículos híbridos em 2026, em uma frota de 52 milhões de veículos.

Neste momento, fala-se apenas em veículos elétricos híbridos, porém em 2021, estima-se que veículos híbridos *flex fuel*, que podem utilizar etanol e eletricidade como combustível, também sejam uma possibilidade (SILVA, 2017).

Ainda segundo SILVA (2017), o Brasil possui vantagens na indústria de biocombustíveis, que possibilitará uma expansão na aceitação dos consumidores da tecnologia *flex fuel*, em um momento em que os veículos puramente elétricos estarão passando por uma baixa de preço mundial.

Com isso, o país passará por dois momentos da inserção dessa tecnologia. O primeiro será com a utilização de veículos utilizando etanol e eletricidade como combustível e, futuramente, em um momento em que os custos dos veículos elétricos terão caído, a recarga desses veículos terá evoluído e todo o processo estará adaptado conforme as melhores práticas adotadas em outros países, o Brasil estará pronto para receber os veículos puramente elétricos (SILVA, 2017).

Já uma projeção realizada pela Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores (Anfavea) e publicada pelo Correio do Povo (2017), prevê que o Brasil terá uma frota de 40 mil carros elétricos em 2020. Este número ainda é baixo se comparada à projeção total realizada no mundo, com uma frota de 20 milhões de carros elétricos.

Ainda de acordo com a matéria publicada pelo Correio do Povo (2017), por mais que os veículos elétricos permitam uma economia de até 84% nos gastos com combustível, o fator determinante para aquisição deste veículo continua sendo o preço final, que chega a ser de duas a três vezes maior do que o mesmo modelo com motor a combustão interna.

Um estudo publicado pela *Bloomberg New Energy Finance* (BNEF) projeta que os veículos elétricos serão mais acessíveis de adquirir do que os veículos a combustão interna até 2022 (DIAS, 2016).

Essa análise foi realizada levando em conta a projeção do preço do petróleo nos Estados Unidos, que chega a atingir entre US\$ 50 e US\$ 70 o barril, por volta de 2020. Além deste fator, a diminuição do custo das baterias de íon-lítio também contribui para a diminuição do custo final do veículo (DIAS, 2016).

### **2.3 Análises e Impactos de Recursos Energéticos Distribuídos**

Os recursos energéticos distribuídos (RED) estão cada vez mais impulsionados, desde a publicação da Regularização Normativa, NR nº 482/2012, pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), onde “estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, o sistema de compensação de energia elétrica, e dá outras providências. ”

A fim de tornar a geração mais limpa e segura, visando a proteção ambiental e confiabilidade na distribuição, existem as gerações distribuídas (GD), que consistem em fontes de energia, que podem ser conectadas diretamente ou próximas ao consumidor, reduzindo os custos e perdas associados a transmissão da energia elétrica. Além disso, a estabilidade e a eficiência energética do sistema melhoram. (INEE, 2018).

Segundo os autores SILVA, HOLLANDA E CUNHA (2016), com a adoção da GD, os consumidores passam a ter mais o controle e gerenciamento do seu consumo de energia. Porém, deverá haver um planejamento acerca da inserção destes sistemas descentralizados, de modo que não cause perturbações nos sistemas atuais.

A utilização da geração distribuída faz com que a rede elétrica seja utilizada apenas nos momentos que a geração local não for suficiente, como é o caso da geração fotovoltaica, onde o pico de geração ocorre ao meio dia e há necessidade de utilização da rede elétrica nos períodos da noite e madrugada. (SILVA, HOLLANDA E CUNHA, 2016).

Segundo a ANEEL (2018), a potência instalada referente a micro e mini geração ultrapassa os 300MW, o suficiente para atender mais de 360 mil residências. A predominância de instalações se dá através das residências, onde correspondem a

77% do total de unidades consumidoras (UCs) instaladas, seguida das UCs comerciais que correspondem a 16%. Estas informações podem ser vistas em detalhes no Quadro 1.

Quadro 1 - Unidades Consumidoras por Classes de Consumo

<b>UNIDADES CONSUMIDORAS COM GERAÇÃO DISTRIBUÍDA</b>			
<b>Classe de Consumo</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Quantidade de UCs que recebem créditos</b>	<b>Potência Instalada (kW)</b>
Comercial	4.306	13.499	147.064,14
Iluminação pública	8	8	84,90
Industrial	655	771	40.262,41
Poder Público	234	282	9.284,97
Residencial	20.566	22.622	93.810,84
Rural	901	1.317	26.993,63
Serviço Público	41	43	1.391,45

Fonte: ANEEL (2018).

Além disso, conforme Quadro 2, há mais de 38 mil conexões de UCs e as fontes mais utilizadas são as provenientes das centrais geradoras fotovoltaicas (UFV), com mais de 80%, seguida das centrais geradoras hidrelétricas (CGH) com 17,5 %. (ANEEL, 2018).

Quadro 2 - Unidades Consumidoras por Tipo

<b>UNIDADES CONSUMIDORAS COM GERAÇÃO DISTRIBUÍDA</b>			
<b>Tipo</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Quantidade de UCs que recebem créditos</b>	<b>Potência Instalada (kW)</b>
CGH	45	6.745	43.325,90
EOL	54	97	10.305,60
UFV	26.525	31.471	240.655,96
UTE	87	229	24.604,88

Fonte: ANEEL (2018).

Conforme o INEE (2018), a demanda de energia elétrica crescerá a medida que os veículos elétricos forem adotados e isto trará um grande impacto aos sistemas de distribuição atual, visto que um veículo consome em média 200Wh/km e para abastecer a quantidade diária necessária para rodagem é preciso que fiquem cerca de 8 horas conectados à uma fonte de energia.

Por outro lado, os veículos elétricos quando conectados ao sistema elétrico podem ser considerados geradores móveis e como a utilização dos mesmos é de aproximadamente 10%, ficando parados na maior parte do tempo, isso pode servir como uma fonte de energia e auxiliar as demandas da rede elétrica, reduzindo os reativos ou até mesmo funcionar como back-ups. (INEE, 2018).

### 2.3.1 Qualidade de Energia

A qualidade de energia elétrica (QEE) está relacionada diretamente à condição da energia entregue por parte da concessionária aos consumidores. Além disso, serve para avaliar a conformidade de tensão em regime permanente e a continuidade operacional, de modo a garantir uma operação segura. (DECKMANN E POMILIO, 2017).

Existem diversos fatores que podem prejudicar a transmissão e a distribuição da energia elétrica, como por exemplo, perturbações causadas por harmônicas, onde pode ocorrer o superaquecimento na carga alimentada ou até mesmo interrupções curtas de fornecimento, causadas por ventanias, tempestades, etc. (DECKMANN E POMILIO, 2017).

Ainda segundo os autores, o não tratamento dos sistemas com problemas relacionados à qualidade de energia reflete negativamente tanto nas concessionárias como nos consumidores, ocasionando a redução da vida útil dos equipamentos ou até mesmo a perda dos mesmos.

A fim de controlar a energia distribuída, a ANEEL elaborou o Procedimento de Distribuição (PRODIST), onde no Módulo 8 aborda a qualidade do produto, que “estabelece os limites ou valores de referência, a metodologia de medição, a gestão das reclamações relativas à conformidade de tensão em regime permanente e às perturbações na forma de onda de tensão e os estudos específicos de qualidade da energia elétrica para fins de acesso aos sistemas de distribuição”.

Além disso, este módulo “estabelece a metodologia para apuração dos indicadores de continuidade e dos tempos de atendimento a ocorrências emergenciais, definindo padrões e responsabilidades”, no que diz respeito a qualidade do serviço. (ANEEL, 2018).

Na seção de qualidade do produto, são analisados os fenômenos em regime permanente ou transitório e traz os indicadores DRP (duração relativa da transgressão



de tensão precária) e DRC (duração relativa da transgressão de tensão crítica), que analisam os níveis de tensão na unidade consumidora, em percentual. Os limites estabelecidos pela ANEEL são de 0,5% para DRC e 3% para DRP. (ANEEL, 2018).

Ainda segundo o Módulo 8 do PRODIST, os indicadores de continuidade servem para a ANEEL acompanhar a qualidade do serviço prestado pelas distribuidoras aos consumidores, e com base nisso tomar as providências caso medidas corretivas não sejam realizadas. (ANEEL, 2018).

Conforme ARIOLI (2016), à medida que os veículos elétricos forem inseridos, haverá um aumento da carga a ser alimentada pelas concessionárias e, com isso, os efeitos irão refletir diretamente na operação do sistema e conseqüentemente na qualidade de energia.

O autor ainda traz uma relação de possíveis impactos:

“queda da magnitude de tensão, aumento no nível de desequilíbrio (os carregadores dos VEs podem ser monofásicos ou bifásicos), sobrecarga dos componentes da rede (cabos ou transformadores), aumento nas perdas elétricas, aumento do nível de distorção harmônica da rede, agravamento de transitórios de tensão e corrente durante curtos-circuitos, entre outros.”

Devido a isso, as redes de distribuição precisarão passar por inúmeras adequações, a fim de evitar maiores transtornos com as conexões destes veículos a rede elétrica. (ARIOLI, 2016).

Ainda segundo o autor, faz-se necessária a avaliação dos níveis de carregamento ao longo do dia, de modo a ter um planejamento mais assertivo do ponto de vista de crescimento de carga, reduzindo assim as perdas relacionadas à inserção dos VEs ao sistema elétrico.

### 2.3.2 Níveis de Carregamento

Os níveis de carregamento são pontos importantes na previsão de demanda das redes de distribuição e são classificados de acordo com o período de utilização da carga. (ANEEL, 2016).

Ainda segundo a ANEEL (2016), estes períodos são divididos em cargas leve, média e pesada, onde a carga leve normalmente ocorre no período da madrugada e em torno de 4h atinge a mínima utilização do sistema elétrico. O patamar de carga pesada, conhecido também como horário de ponta, ocorre das 18h às 21h, onde a

utilização do sistema é bastante elevada, devido à utilização de diversas cargas, tanto industriais como residências. Fora destes horários citados temos o patamar de carga médio ou intermediário, onde há variações nos níveis de carregamento, porém sem sobrecarregar o sistema.

No Quadro 3, o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) apresenta os diferentes patamares de carga de acordo com o horário e dia da semana.

Quadro 3 - Patamares de Carga

Patamar de Carga	Sem horário de verão		Com horário de verão	
	2ª feira a Sábado	Dom/Fer	2ª feira a Sábado	Dom/Fer
Pesada	18 h às 21 h	-	19 h às 22 h	-
Média	07 h às 18 h 21 h às 24 h	17 h às 22 h	07 h às 19 h 22 h às 24 h	18 h às 23 h
Leve	00 h às 07 h	00 h às 17 h 22 h às 24 h	00 h às 07 h	00 h às 18 h 23 h às 24 h

Fonte: ONS (2017).

Conforme abordado no tópico 2.1.4, os estudos acerca dos veículos elétricos indicam a necessidade de otimização do uso da eletricidade, seja através de sistemas inteligentes ou até mesmo com a criação de tarifação diferenciada, a fim de deslocar a utilização de energia para horários fora de ponta, reduzindo assim o carregamento no sistema. (SILVA, 2017).

Ainda segundo a autora, a utilização das baterias dos VEs para armazenamento da energia solar gerada em excesso ao longo do dia já tem sido explorada na Califórnia e tem por objetivo reduzir as variações do sistema elétrico e melhorar tanto os indicadores de qualidade quanto o nível de carregamento da rede nos horários de maior demanda.

A necessidade da resposta imediata às diversas variações no sistema elétrico, seja com a inserção de cargas indutivas ou carregamento de VEs, torna ainda mais imprescindível a utilização das redes elétricas inteligentes, onde o controle da demanda e a reconfiguração automática auxiliam no aumento da eficiência dos recursos e consequentemente do sistema. (PFITSCHER, 2013).

### 2.3.3 Demanda e Consumo

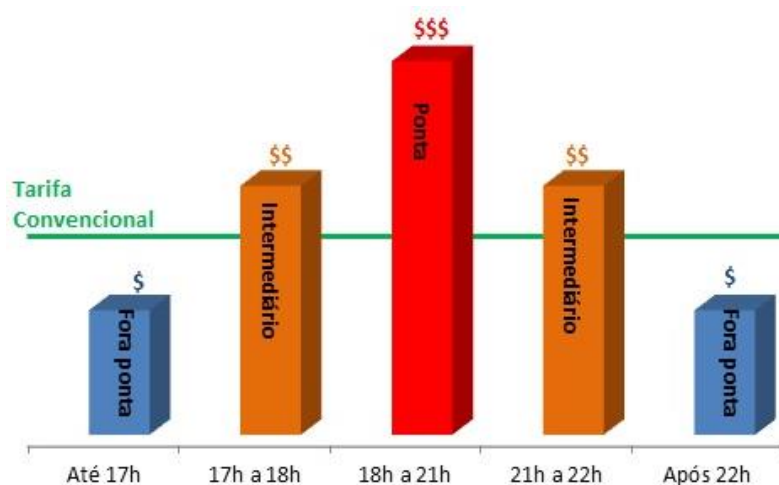
Gradativamente os veículos elétricos vão sendo introduzidos ao sistema energético e com isso surgem as necessidades de adequações nas redes elétricas para atendimento à demanda destes automóveis. Porém, CASTRO E FERREIRA (2010) comentam que os sistemas de geração existentes possuem folgas de segurança para funcionamento e a curto prazo conseguirão absorver o incremento de carga destes VEs.

Conforme a ABB (2018), o maior impacto no curto prazo ocorrerá ao redor das subestações e não na parte da geração, pois as redes elétricas não foram projetadas para suportar a alta demanda em determinado horário, como no horário de pico.

Para contornar este impacto, surge uma nova modalidade tarifária, conhecida como Tarifa Branca, onde a ANEEL (2017) define como “uma nova opção que sinaliza aos consumidores a variação do valor da energia conforme o dia e o horário do consumo”.

Ainda segundo a ANEEL (2017), com a Tarifa Branca, os hábitos de consumo tendem a mudar, deslocando a utilização da energia para fora dos horários de maior demanda. As tarifas para horário fora de ponta são mais baratas, conforme a Figura 5, e com isso os consumidores passam a pagar menos pela utilização da energia elétrica.

Figura 5 - Comparativo entre os Horários de Utilização na Modalidade Tarifária - Tarifa Branca



Fonte: COPEL (2018).

Um artigo publicado na Revista Potencia (2018), cita que com a criação desta modalidade tarifária, a expectativa é de que a utilização da energia seja mais uniforme ao longo do dia. Aliando isso ao uso das Redes Inteligentes, será possível melhorar a gestão pelo lado da demanda e conhecer os perfis de carga dos clientes, o que facilita a implementação de controles de armazenamento e distribuição de energia.

### 2.3.4 Planejamento

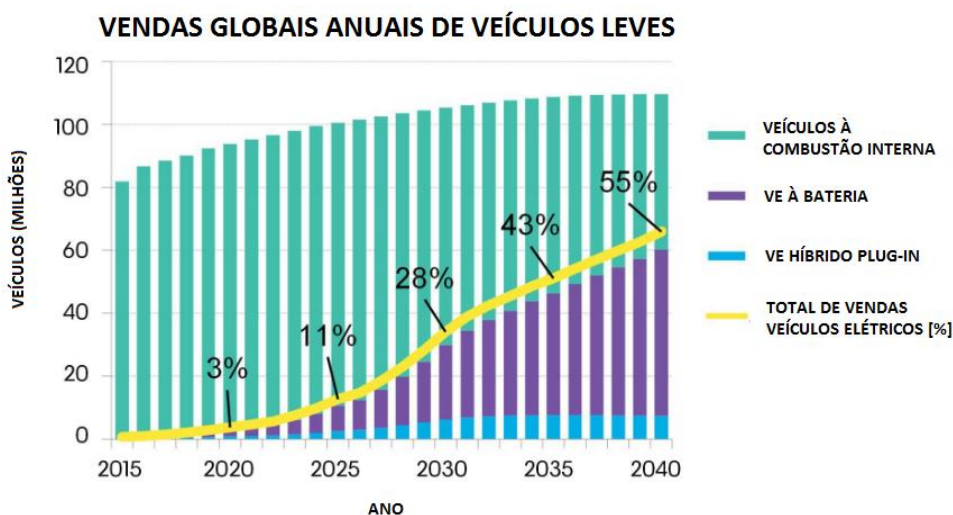
De acordo com o PDE2026 publicado pela EPE, prevê-se uma grande mudança no setor energético, motivada pelo aumento das gerações distribuídas, implantação de sistemas inteligentes e entrada dos veículos elétricos.

A incerteza relacionada à aceitação destas mudanças tecnológicas impacta diretamente a projeção da expansão dos sistemas elétricos, no que diz respeito a demanda energética do país. (PDE2026).

Segundo WELLE (2018), existem mais de 3 milhões de veículos elétricos em circulação no mundo. Com a atual taxa de crescimento do mercado de automóveis, há perspectivas de que 5 milhões de veículos elétricos sejam licenciados por ano até 2025.

Como complemento, o relatório da *Bloomberg New Energy Finance* (2018) prevê que os veículos elétricos representarão 33% da frota de veículos leves de passeio e 55% das vendas de carros novos até 2040 e este crescimento pode ser visualizado graficamente através da Figura 6.

Figura 6 - Vendas Globais Anuais de Veículos Leves



Fonte: Adaptado de Bloomberg New Energy Finance (2018).

Com esta evolução de vendas do mercado automotivo, é estimado um aumento de 6% da demanda global por eletricidade, o que representa um acréscimo de 2.000 TWh, em 2040. (Bloomberg New Energy Finance, 2018).

Para atender esta taxa de crescimento, ou seja, a nova demanda de carga, é necessário que o sistema passe por modificações, como por exemplo, o dimensionamento de novas subestações. (BAQUERO, 2012).

Ainda segundo o autor, estas alterações precisam ser previamente planejadas, a fim de diluir o investimento ao longo dos anos e manter os padrões de segurança e operação nas redes elétricas existentes.

Olhando pelo lado do carregamento dos veículos elétricos, SILVA (2014) comenta que se não for de uma forma planejada, estes causarão um enorme impacto nas redes elétricas, principalmente em horários de ponta, onde há a maior demanda, e com isso serão necessários altos investimentos para suprir esta necessidade.

Como complemento, FERNANDES (2013) cita a importância do planejamento e utilização da Tarifa Branca, por exemplo, a fim de evitar imprevistos e investimentos desnecessários no fornecimento de energia, por parte das concessionárias.

### 2.3.5 Operação

Muitos benefícios giram em torno da inserção dos veículos elétricos na frota existente hoje, principalmente quando falamos de impactos ambientais causados pelos veículos a combustão interna com a emissão de gases de efeito estufa e poluição sonora, pois estudos mostram que com os veículos elétricos haveria uma redução significativa deste impacto ambiental. (FERNANDES, 2013).

Contudo, FERNANDES (2013) cita a necessidade de avaliar o impacto que a inserção destes veículos provocará na operação da rede elétrica atual, pois as montadoras planejam a fabricação em massa de veículos elétricos do tipo plug-in, que necessitam estar conectados na tomada para realizar o carregamento, demandando mais energia das redes existentes hoje.

Ainda segundo o autor, não se pode basear o impacto do carregamento desses veículos apenas em estratégias pré-estabelecidas, como o carregamento noturno ou em horários de menor consumo da energia, ou até mesmo do aproveitamento de plantas e usinas geradoras de energia ociosas, mas sim na garantia de que os circuitos sejam robustos o suficiente para aguentarem a carga adicional.

Esses veículos necessitam de uma quantidade bem significativa de potência para serem carregados, principalmente em modo rápido, ou seja, se fossem ligados 2 ou 3 veículos a energia, dependendo do seu nível de carregamento, poderia ocasionar uma sobrecarga aos transformadores de distribuição de média/baixa tensão. (FERNANDES, 2013).

O autor ainda cita que a média maior de consumo diária de energia ocorre das 18h às 22h e o menor consumo se dá após às 22 horas. Com isso, existem diferentes tipos de impacto que a inserção dos veículos elétricos plug-in pode causar no sistema, dependendo da hora em que forem conectados à rede e a forma como serão carregados.

Contudo, uma matéria publicada pelo INEE (Instituto Nacional de Eficiência Energética) aborda um ponto a ser considerado, como os veículos ficam desligados mais de 90% do tempo e possuem computadores de controle a bordo, podem funcionar como reservas de energia e cumprir com papéis de geradores distribuídos de energia.

Segundo DELGADO, FEBRARO E SILVA (2017), as redes inteligentes irão possibilitar um melhor gerenciamento da recarga dos veículos elétricos, minimizando seus impactos, tornando estes veículos geradores de energia através do sistema V2G (*vehicle to grid*). Essa configuração pode compensar o aumento da demanda de energia e até mesmo reduzir a necessidade de expansão do sistema de distribuição.

Com a tecnologia V2G os veículos elétricos poderiam atuar como buffers da rede, pois têm a possibilidade de armazenamento de energia em suas baterias. Eles podem armazenar energia durante os horários de baixo consumo e devolver essa energia para a rede nos períodos que necessitam de maior demanda energética. (CALÇADO, 2015).

## **2.4 Trabalhos Relacionados**

Realizando a presente pesquisa, referente ao tema Veículos Elétricos, foram encontrados artigos relacionados ao tema, que abrangem focos de estudo diferentes do intuito desta pesquisa. Foram elencados dois artigos para serem explorados nesta sessão.

No primeiro artigo, BASSO (2011) aborda o tema veículos elétricos com um viés voltado para sustentabilidade e uma análise da emissão de CO<sub>2</sub> destes veículos quando carregados utilizando energia proveniente de termelétricas.

O autor afirma que uma das principais vantagens dos veículos elétricos é a emissão inexistente de poluentes na atmosfera, mas que essa não é a única questão que deve ser levada em consideração.

Existe uma categoria de veículos elétricos plug-ins, que necessitam estar conectados a algum dispositivo para recarregarem suas baterias. A alimentação desses carregadores distribuídos nas ruas é provida de diferentes fontes de energia, dentre elas, há as termelétricas, onde a utilização de combustíveis derivados do petróleo e carvão são mais recorrentes.

Devido a este fator, o autor faz uma análise comparativa entre a emissão provocada pelos veículos a combustão interna e a provocada pelas termelétricas, que alimentam a energia utilizada no carregamento dos veículos elétricos plug-ins.

Dessa análise, o autor conclui que um veículo elétrico plug-in pode impactar a atmosfera mais do que um veículo a combustão interna, caso sua energia seja proveniente de uma termelétrica, onde esta pode emitir 84% a mais de CO<sub>2</sub> para suprir a necessidade de um veículo.

Outro artigo abordado é do autor VONBUN (2015), onde ele relata benefícios e custos relacionados aos veículos elétricos e híbridos do tipo plug-in, enfatizando a redução da emissão de gases nocivos à saúde e efeito estufa.

O autor cita que os veículos híbridos ainda precisam superar algumas restrições tecnológicas e culturais, mas possuem potencial para aumentar a eficiência energética no setor de transportes e contribuir para redução dos custos de produção de energia elétrica.

Os veículos híbridos também são vistos pelo autor como uma ponte entre os veículos a combustão interna e os veículos puramente elétricos, quando o desenvolvimento tecnológico dos mesmos permitir a adoção em massa destes veículos.

Neste artigo, o autor aborda uma linha de raciocínio próxima ao artigo anterior, de BASSO (2011), onde o mesmo cita que é necessário avaliar as vantagens de trocar a frota atual de veículos a combustão pelos híbridos e elétricos, uma vez que estes veículos são abastecidos por energia elétrica proveniente de usinas que em sua maior

parte utilizam combustível para funcionar, o que apenas mudaria o ponto de emissão e não reduziria o mesmo.

Em sua revisão de literatura, VONBUN (2015) cita dois outros autores que fizeram um estudo em uma província no Canadá, MOORHOUSE E LAUFENBERG (2010), que possui características diferentes no setor energético, ou seja, 93% da energia elétrica produzida é limpa, proveniente de hidrelétricas. Essa característica é muito semelhante ao Brasil, onde 90% da energia elétrica consumida no país vem de usinas hidrelétricas.

O autor assume que, se a energia consumida pelos veículos elétricos for originada pelas fontes limpas como atualmente, esses veículos são a solução para as mudanças climáticas e qualidade do ar.

Contudo, compreende que os híbridos também têm sua parcela na redução da poluição atmosférica. Os veículos puramente elétricos reduzem as emissões de gases de efeito estufa em 80%, seguidos pelos híbridos plug-in que reduzem em 55%, e os veículos híbridos não plug-in reduzindo a emissão em 30%.

Segundo o autor, uma estratégia interessante, seria estudar alternativas, custos e benefícios para modernizar e implantar soluções de motores elétricos no transporte público, uma vez que a popularização dos veículos individuais pode se dar de forma mais lenta devido aos custos envolvidos.

O que difere o presente artigo dos demais artigos relacionados citados neste tópico é o foco principal na avaliação de possíveis sobrecargas na rede elétrica no momento do carregamento das baterias dos veículos elétricos, analisando se uma inserção em massa destes veículos pode ocasionar falhas no fornecimento de energia nas cidades.



### 3 METODOLOGIA

No desenvolvimento deste projeto, foi realizada uma pesquisa exploratória e descritiva para contextualização do tema escolhido, ou seja, trazer da literatura as informações de quando o interesse por veículos menos poluentes começou a ganhar força, quando começaram os investimentos mais focados no desenvolvimento destes veículos e as expectativas de expansão em torno do assunto.

Para alcançar os objetivos propostos, foram adotados alguns procedimentos para coleta dos dados e conclusão dos objetivos apresentados. Um dos procedimentos foi a pesquisa bibliográfica, que auxiliou na busca de trabalhos relacionados ao tema proposto, onde foi possível analisar o que foi discutido e relacionar com os dados coletados, que serão abordados no decorrer do projeto.

Outro procedimento adotado foi o estudo de caso, que foi possível através do mapeamento dos cenários estudados e simulados, de acordo com as classes consumidoras detalhadas no tópico 4.1.2, sendo eles:

- Primeiro cenário: abordagem da rede elétrica pura, sem veículos elétricos como carga ou como geração distribuída;
- Segundo cenário: foi estudada a rede do primeiro cenário com penetração de veículos elétricos;
- Terceiro cenário: foram inseridos veículos elétricos operando como geração distribuída no segundo cenário.

Com isso, foi necessário avaliar uma ferramenta que possibilitasse a modelagem da rede de distribuição, o cálculo do fluxo de potência e fornecesse resultados de forma clara para análise.

Para as simulações dos cenários descritos, foi utilizada a ferramenta *OpenDSS* (*Open Distribution System Simulator*), que é um software de código aberto de simulação para sistemas de distribuição de energia elétrica. Em conjunto com o *OpenDSS*, foi utilizado o *Excel*, ferramenta licenciada da *Microsoft* para organização e análise dos dados coletados.

Em um primeiro momento, foi definida e modelada a rede de distribuição que serviu de base para as análises necessárias, a fim de atingir o objetivo geral deste trabalho.

Com o sistema definido, foram determinadas as curvas típicas de cargas e perfis de consumidores, onde neste estudo os mesmos foram identificados de forma

aleatória, sendo divididos em classes residenciais, comerciais e industriais, podendo estas serem alteradas de acordo com a rede em análise.

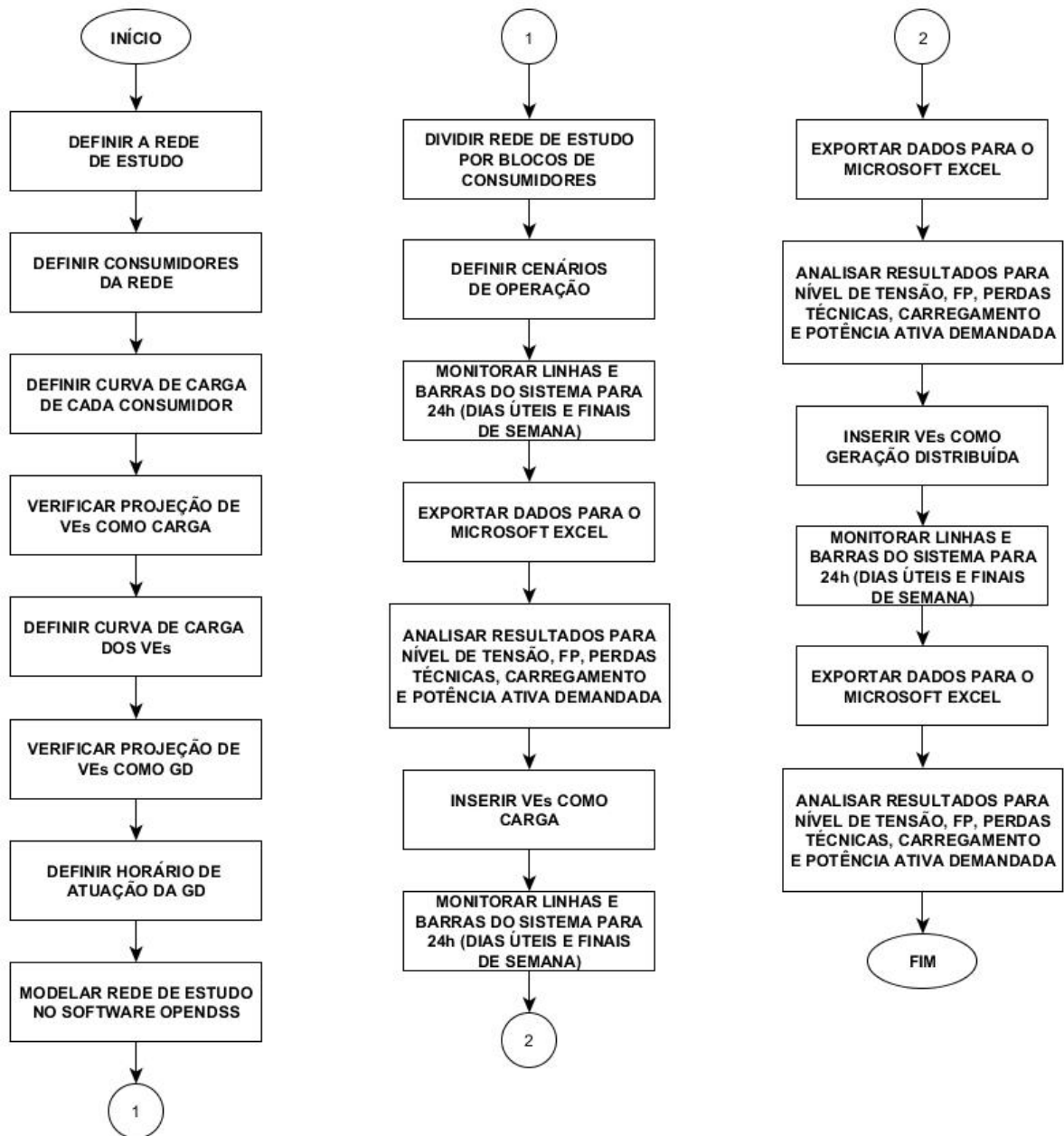
Foram analisados cenários de inserção dos veículos elétricos, ora como carga, ora como gerador, no sistema de distribuição. Para realizar essas simulações, foi necessário estabelecer um modelo de veículo para experimento. O veículo utilizado foi o novo Nissan Leaf, com prazo para chegada ao Brasil em 2019, segundo a fabricante do mesmo.

As características necessárias para as simulações foram as de capacidade da bateria e tempo de carregamento do veículo, sendo que este modelo é da categoria dos puramente elétricos, ou seja, seu motor é alimentado apenas por energia elétrica, e possui uma bateria recarregável.

Com isso, foram avaliados os níveis de tensão, indicadores de qualidade de energia, níveis de carregamento do sistema, fator de potência, perdas técnicas e potência ativa demandada, para as 24 horas do dia, em dias úteis e fins de semana.

Para melhor entendimento dos passos realizados na execução deste trabalho, foi elaborado um fluxograma, que está ilustrado na Figura 7.

Figura 7 - Fluxograma da metodologia adotada



Fonte: Elaborado pelo Autor.

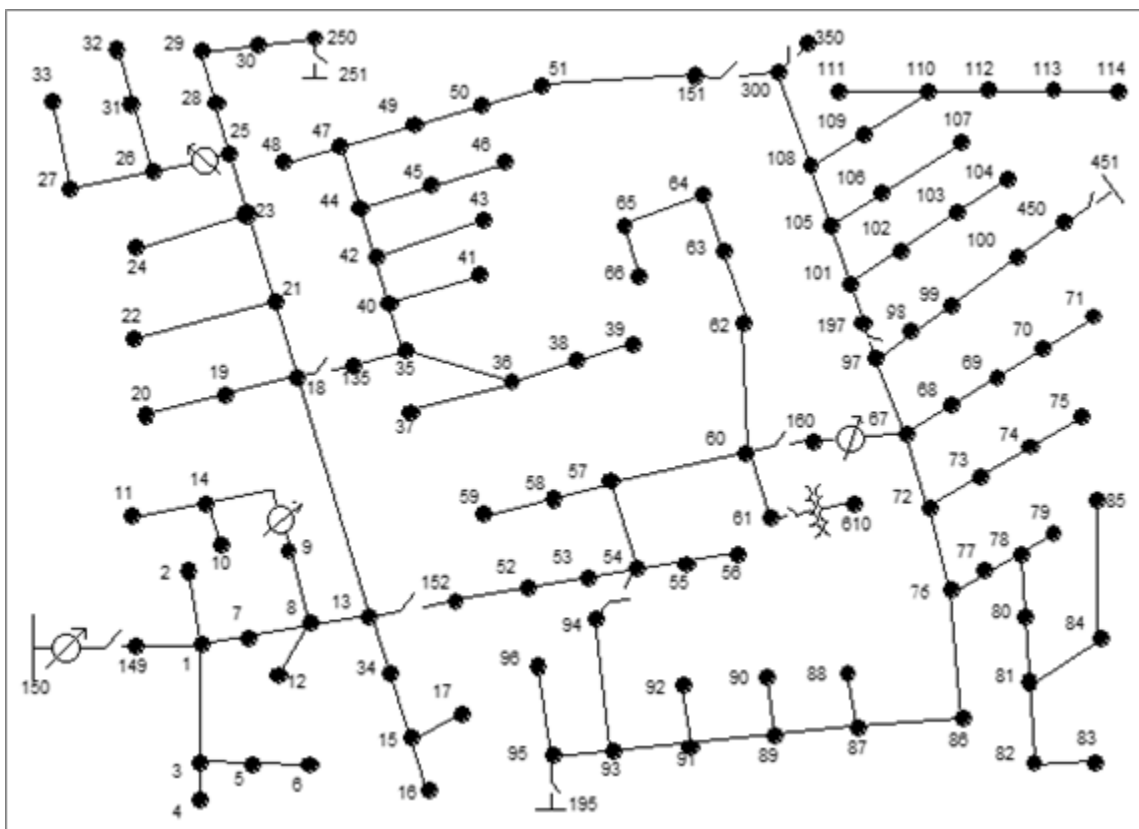
## 4 ESTUDO DE CASO

Neste capítulo serão apresentados todos os passos desenvolvidos para que os objetivos específicos fossem alcançados. Inicialmente será apresentada a topologia da rede de estudo adotada e suas características e, na sequência, a aplicação da metodologia através das simulações realizadas. Por fim, serão analisados os resultados encontrados e comparados com os limites estabelecidos pela ANEEL.

### 4.1 Rede de Estudo e suas Características

A rede escolhida para desenvolvimento do estudo de caso foi o modelo IEEE 123 Node Test Feeder. Conforme o IEEE (2014), este sistema é composto por linhas aéreas e subterrâneas, cargas desequilibradas, bancos de capacitores, reguladores de tensão, etc. e o mesmo pode ser visto na Figura 8.

Figura 8 - Sistema IEEE 123 Node Test Feeder



Fonte: IEEE (2014).

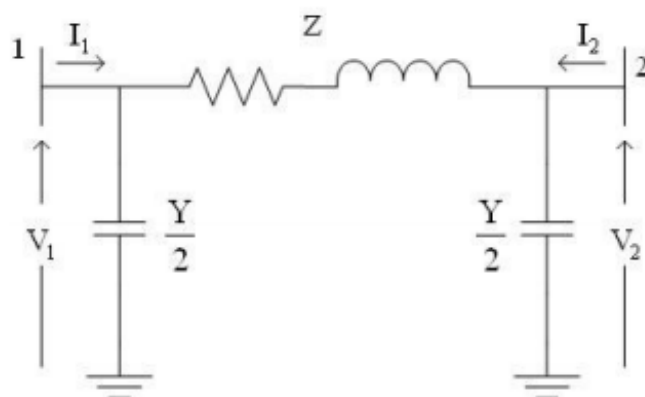
Originalmente, esta rede de distribuição opera com tensão nominal de 4,16 kV e não possui quedas de tensões consideráveis enquadradas como críticas ou precárias. Para a aplicação da metodologia proposta neste trabalho, o sistema foi adaptado para uma tensão nominal de 13,8 kV, a mais usual em redes de distribuição nas regiões do Brasil.

Além da modificação da tensão nominal da rede original, o comprimento das linhas que compõe o sistema teve sua extensão ampliada em 5 vezes, de modo que houvessem perdas significativas no sistema e níveis de tensão próximos a região precária. O modelo IEEE é conectado a um barramento infinito, representado no sistema pela barra 150.

#### 4.1.1 Linhas

As linhas de transmissão da rede de distribuição do IEEE 123 barras são representadas por parâmetros concentrados conforme modelo PI ( $\pi$ ), onde os comportamentos resistivos e indutivos compõem a impedância  $Z$  e o comportamento capacitivo compõe a admitância  $Y$ . Este modelo pode ser visto na Figura 9 e os valores variam de acordo com a configuração dos cabos adotada.

Figura 9 – Modelo  $\pi$



Fonte: LEMOS (2008)

As linhas de transmissão deste sistema foram modeladas para redes aéreas e redes subterrâneas, variando de acordo com a sequência de fases adotada. No total, são 12 diferentes configurações e as mesmas podem ser compreendidas através da análise dos Quadros 4 e 5.

Quadro 4 – Configuração das Linhas Aéreas

Configuração	Fases	Condutor Fase (CAA)	Condutor Neutro (CAA)
1	A B C N	336,400 26/7	4/0 6/1
2	C A B N	336,400 26/7	4/0 6/1
3	B C A N	336,400 26/7	4/0 6/1
4	C B A N	336,400 26/7	4/0 6/1
5	B A C N	336,400 26/7	4/0 6/1
6	A C B N	336,400 26/7	4/0 6/1
7	A C N	336,400 26/7	4/0 6/1
8	A B N	336,400 26/7	4/0 6/1
9	A N	1/0	1/0
10	B N	1/0	1/0
11	C N	1/0	1/0

Fonte: Adaptado do IEEE (2014).

Quadro 5 – Configuração das Linhas Subterrâneas

Configuração	Fases	Cabo
12	A B C	1/0 AA, CN

Fonte: Adaptado do IEEE (2014).

A rede IEEE 123 possui 118 linhas, sendo apenas 5 subterrâneas. Todas as barras do sistema são conectadas através das linhas de transmissão, permitindo assim a alimentação de todo o sistema, através do barramento infinito (barra 150). As matrizes de impedância e susceptância são originalmente configuradas em ohm/1000ft, sendo necessária a conversão para ohm/km, através da Equação 1.

$$\frac{1 \Omega}{1000\text{ft}} = \frac{3,2808399 \Omega}{\text{km}} \quad (1)$$

As matrizes convertidas para o Sistema Internacional de Unidades (SI), foram declaradas como “*LineCode*” no software *OpenDSS*, e numeradas de acordo com a configuração de cada linha. Com isso, é possível alterar a configuração das linhas presentes na rede de distribuição, alterando apenas o número da *LineCode*.

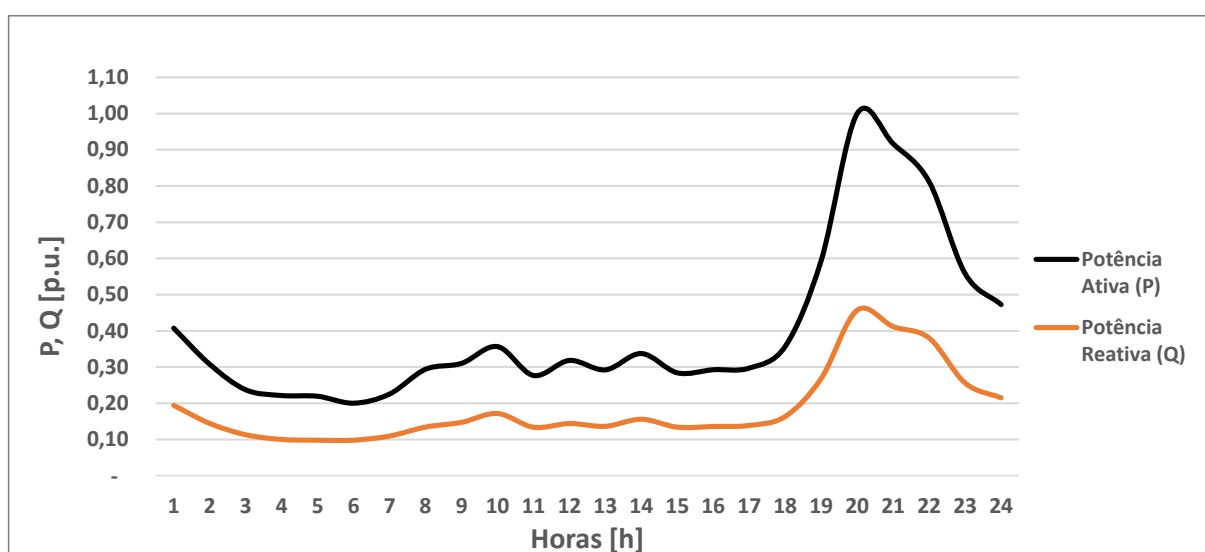
#### 4.1.2 Cargas

A rede de estudo IEEE 123 barras possui 91 cargas conectadas ao sistema, configuradas de diferentes formas, sendo divididas em cargas monofásicas, bifásicas ou trifásicas. Os valores de potência ativa e reativa, bem como o modelo de cada carga presente na rede de distribuição foram mantidos os mesmos definidos pelo IEEE.

A conexão das cargas ao sistema pode ser realizada de duas formas, através da ligação em delta ( $\Delta$ ) ou da ligação em estrela (Y) e para cada carga foi definido um perfil de consumidor.

Nas Figuras 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16 e 17, podem ser observadas as curvas típicas por unidade (p.u.) de cada classe consumidora, divididas em: residencial com consumo até 500 kWh, residencial com consumo acima de 500 kWh, comercial e industrial, para dia útil e fim de semana.

Figura 10 – Perfil de Consumidor Residencial até 500 kWh em Dia Útil

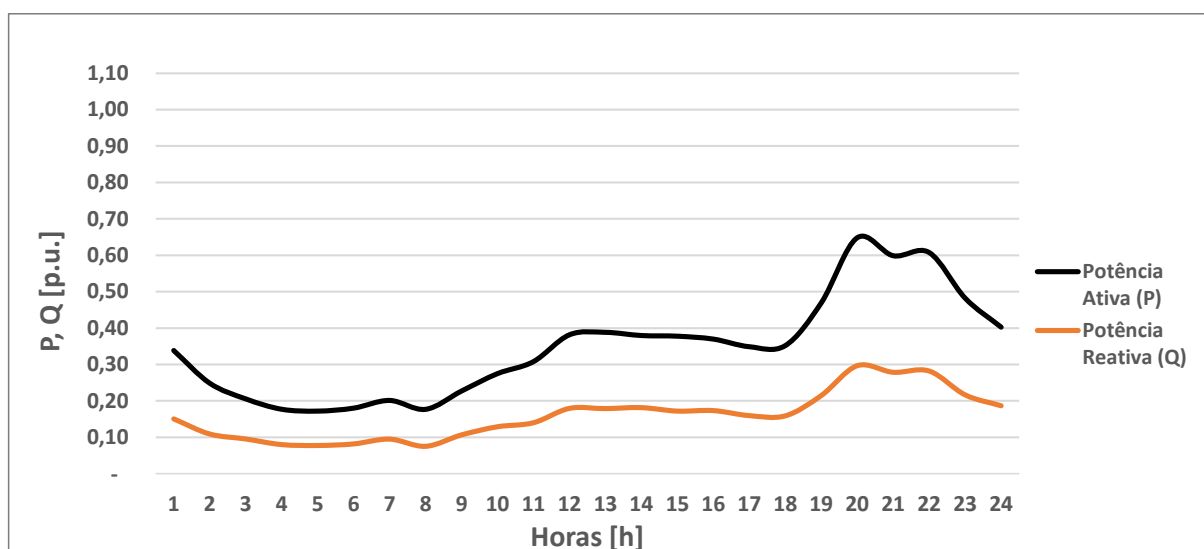


Fonte: Elaborado pelo Autor.

O perfil de consumo da classe residencial até 500 kWh, em dias úteis, apresentado na Figura 10, possui pequenas oscilações no intervalo da 1h até as 18h, mantendo o valor abaixo de 0,4 p.u. A partir das 18h o consumo cresce rapidamente e atinge a marca de 1 p.u. de potência ativa, às 20h. Após este horário, há uma redução na potência, cujos valores retornam aos níveis abaixo de 0,4 p.u.

Para os fins de semana, conforme a Figura 11, o consumo destes clientes segue o mesmo padrão dos dias úteis, com nível de consumo abaixo de 0,4 p.u. até as 18h e após este horário, há um acréscimo, porém não ultrapassa o valor de 0,65 p.u. de potência.

Figura 11 – Perfil de Consumidor Residencial até 500 kWh em Fim de Semana



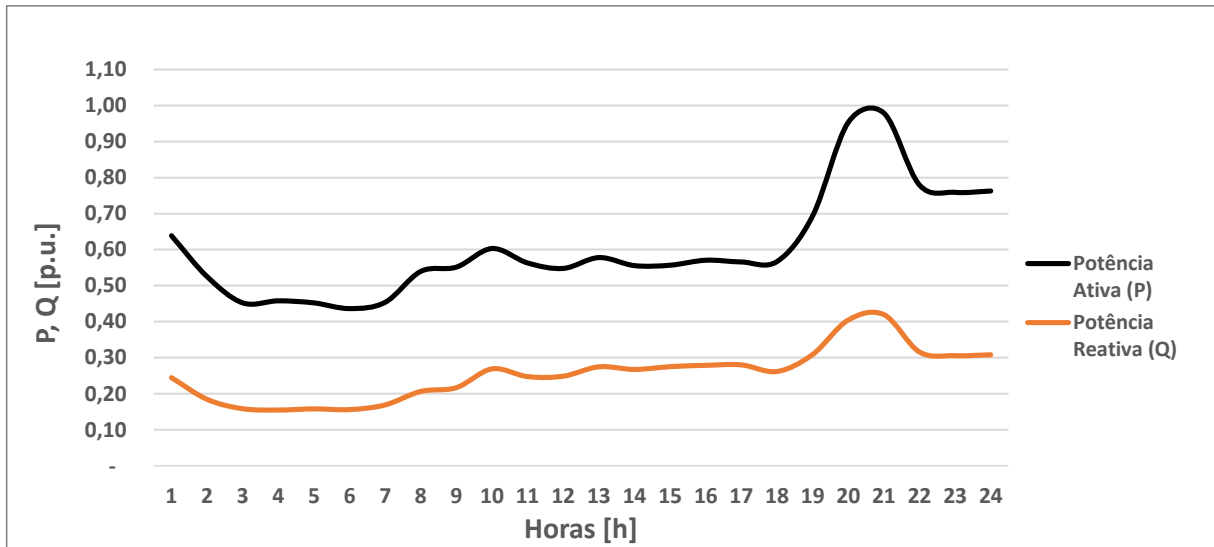
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Para os clientes da classe residencial com consumo acima de 500 kWh, a curva típica para dias úteis é apresentada na Figura 12. Os valores de potência se mantem estável da 1h até as 18h, com variação a partir das 18h, atingindo o valor máximo de 1 p.u. as 20h. Após este horário, o consumo é reduzido e chega ao valor de 0,76 p.u. à meia noite.

Aos fins de semana, conforme a Figura 13, os clientes desta classe possuem um perfil de consumo semelhante aos dias úteis ao longo do dia, até às 18h. Após, há um aumento na potência, chegando a atingir o valor máximo de 0,79 p.u. às 20h.

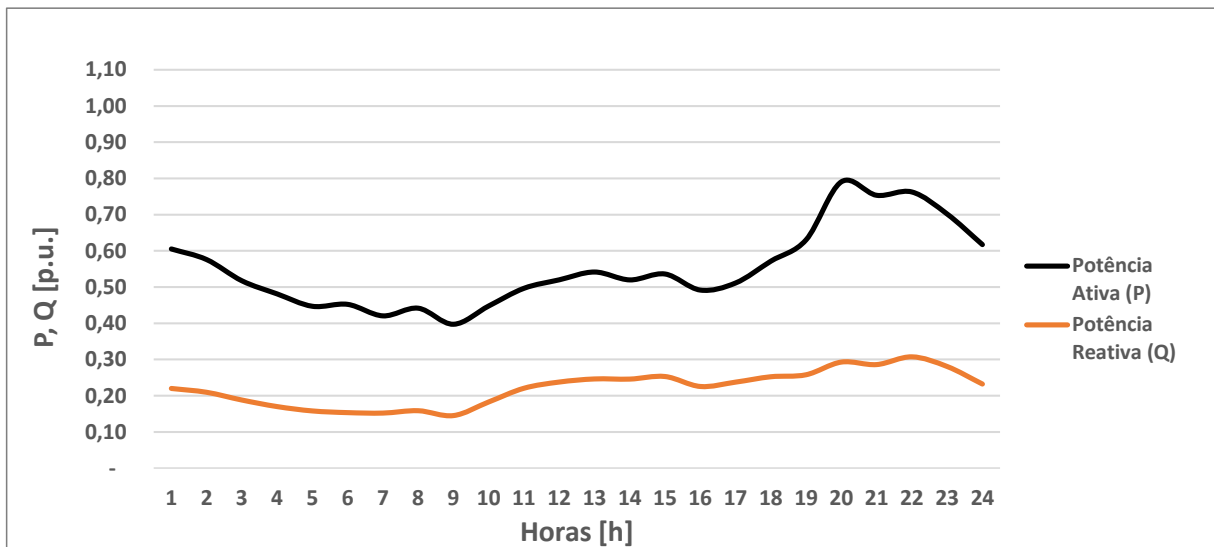


Figura 12 – Perfil de Consumidor Residencial acima de 500 kWh em Dia Útil



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 13 – Perfil de Consumidor Residencial acima de 500 kWh em Fim de Semana

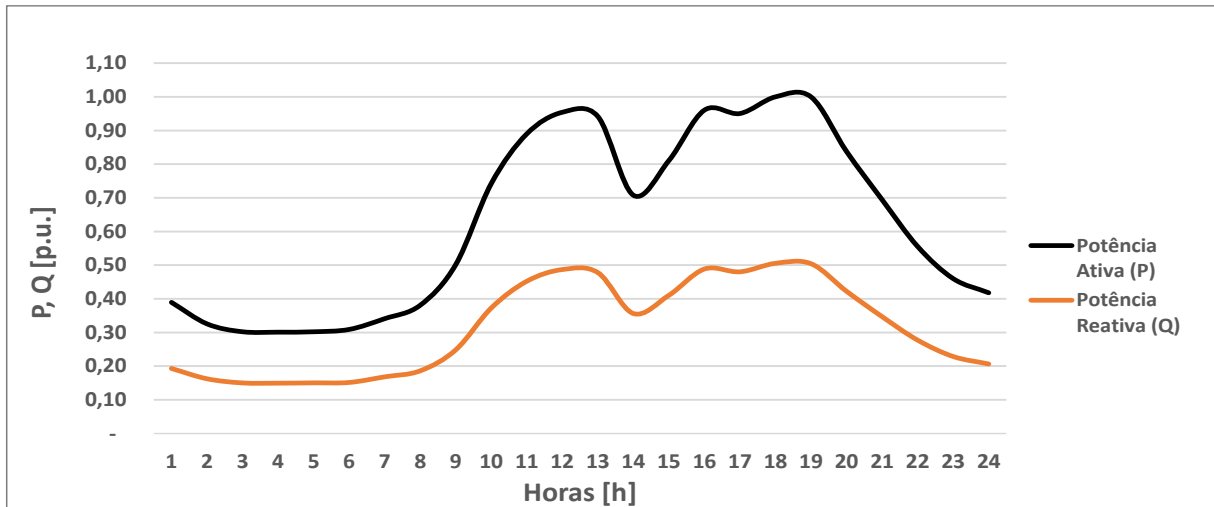


Fonte: Elaborado pelo Autor.

Nas Figuras 14 e 15, são apresentadas as curvas típicas para consumidores do tipo comerciais. Pode-se observar que há uma grande variação entre os dias úteis e fins de semana.

Nos dias úteis, o consumo é bastante elevado no período das 9h às 20h, atingindo valores de aproximadamente 1 p.u., havendo uma queda das 13h às 14h, devido ao intervalo de almoço adotado pelos estabelecimentos comerciais.

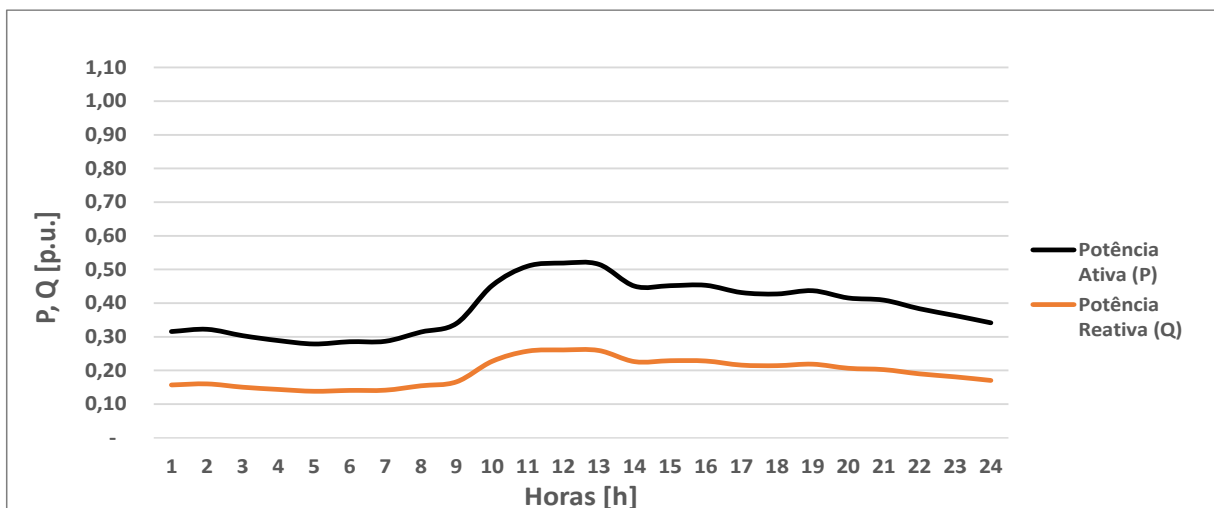
Figura 14 – Perfil de Consumidor Comercial em Dia Útil



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Aos fins de semana, o consumo é alterado consideravelmente e os valores de potência não ultrapassam a marca de 0,6 p.u. Nota-se que durante o período das 9h às 13h o consumo é maior quando comparado ao restante do dia, devido ao horário de expediente adotado pelos estabelecimentos nos fins de semana.

Figura 15 – Perfil de Consumidor Comercial em Fim de Semana

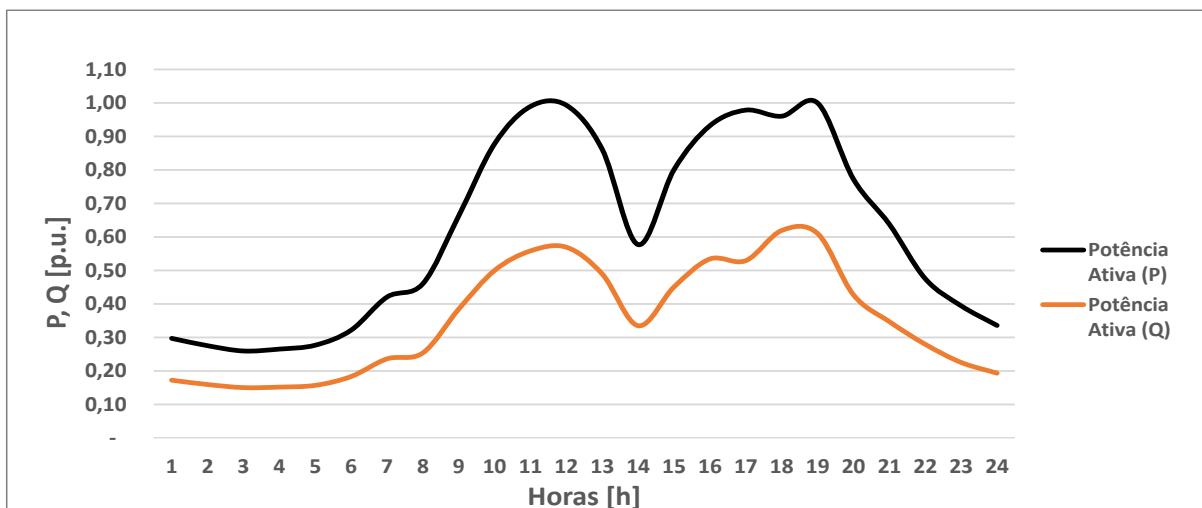


Fonte: Elaborado pelo Autor.

Para os clientes do tipo industrial, a curva típica de consumo, apresentada na Figura 16, cresce rapidamente a partir das 8h e atinge os valores máximos de potência às 12h. Entre às 13h e 14h, há uma redução no consumo devido ao intervalo de almoço. Após este horário, o consumo volta a crescer, atingindo novamente a potência

máxima às 19h. Após este horário, o consumo é reduzido para valores abaixo de 0,3 p.u. representando o fim do expediente de trabalho.

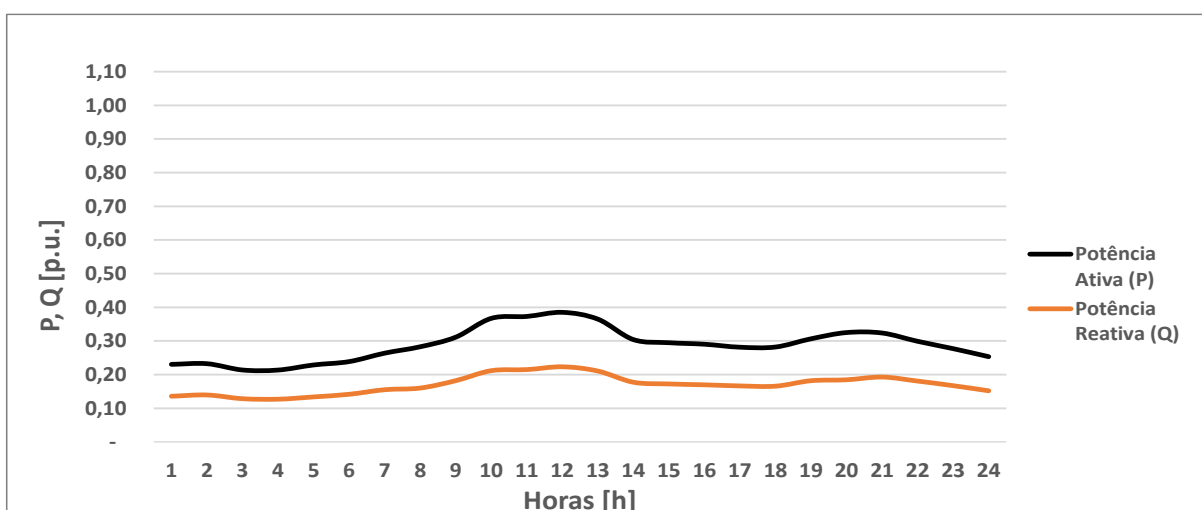
Figura 16 – Perfil de Consumidor Industrial em Dia Útil



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Aos fins de semana, o consumo é estável ao longo de todo o dia, não ultrapassando o valor de 0,4 p.u. de potência. Este perfil de consumo pode ser visto na Figura 17.

Figura 17 – Perfil de Consumidor Industrial em Fim de Semana



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Todas as curvas típicas foram normalizadas em função dos valores máximos de potência ativa (P) e reativa (Q). A classe consumidora residencial foi utilizada como referência para normalização das demais classes.

Quanto aos modelos utilizados para cada carga, conforme citado anteriormente nesta seção, os mesmos não foram alterados com relação à rede original do IEEE e podem ser observados no Quadro 6.

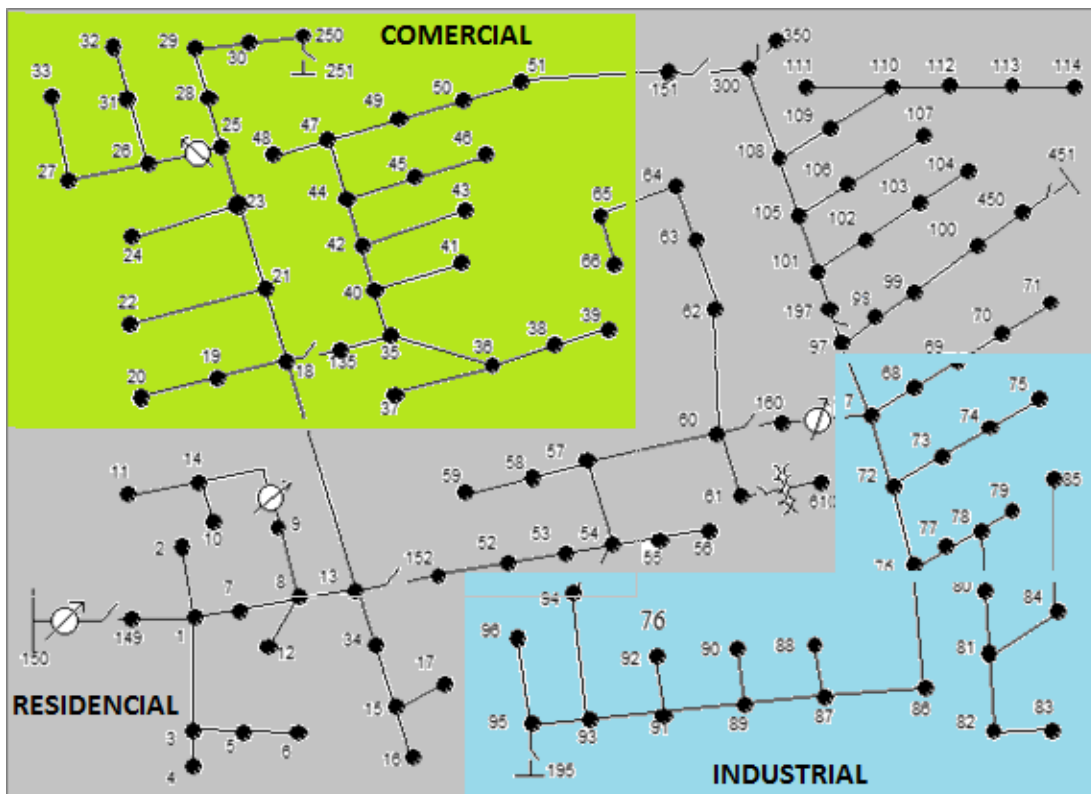
Quadro 6 – Modelo de Cargas

Modelo	Descritivo	Código no <i>OpenDss</i>
Y-PQ	Ligação em Estrela com Potência Constante	1
D-PQ	Ligação em Delta com Potência Constante	1
Y-Z	Ligação em Estrela com Impedância Constante	2
D-Z	Ligação em Delta com Impedância Constante	2
Y-I	Ligação em Estrela com Corrente Constante	5
D-I	Ligação em Delta com Corrente Constante	5

Fonte: Adaptado do IEEE (2014).

Os perfis de consumidores para cada carga foram definidos aleatoriamente e divididos por blocos conforme a Figura 18, e o resultado do somatório por classe consumidora pode ser visto na Quadro 7.

Figura 18 – Divisão das Classes Consumidoras por Blocos



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Quadro 7 – Potências Ativa e Reativa por Classes de Consumo

Classes de Consumo	Fase A (P) [kW]	Fase A (Q) [kVAr]	Fase B (P) [kW]	Fase B (Q) [kVAr]	Fase C (P) [kW]	Fase C (Q) [kVAr]
Res <= 500	295	155	230	120	250	140
Res > 500	200	100	60	30	235	115
Comercial	500	280	295	185	320	185
Industrial	425	240	330	180	350	190
<b>Total</b>	<b>1420</b>	<b>775</b>	<b>915</b>	<b>515</b>	<b>1155</b>	<b>630</b>

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Analisando o Quadro 7 é possível verificar que a potência ativa total demandada pelas cargas originais do sistema é de aproximadamente 3,5 MW e a potência reativa total é de aproximadamente 2 MVar, considerando as fases A, B e C.

#### 4.1.3 Consumidores

Para determinar o número de consumidores presentes na rede de estudo, utilizou-se a soma da potência aparente das classes consumidoras, considerando 1,2 clientes para cada 1 kVA. (VIACAVA, 2014). A potência total aparente calculada através da Equação 2 é de aproximadamente 3,9 MVA, resultando em um total de 3.321 clientes, cujo resumo é apresentado no Quadro 8.

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (2)$$

Quadro 8 – Quantidade de Consumidores

Classes de Consumo	Total S (kVA)	Consumidores
Res <= 500	879,12	733
Res > 500	552,31	460
Comercial	1.290,63	1.076
Industrial	1.262,19	1.052
<b>Total</b>	<b>3.984,25</b>	<b>3.321</b>

Fonte: Elaborado pelo Autor.

A partir dos dados de consumidores conectados na rede original do IEEE, partiu-se para a análise da penetração de veículos elétricos, bem como a sua

utilização como fontes geradoras de energia. Estes valores encontrados serviram de base para a aplicação de toda a metodologia proposta neste trabalho.

#### 4.1.4 Penetração de Veículos Elétricos

Para análise do comportamento dos veículos elétricos, foi necessário o levantamento de informações sobre o veículo em estudo. A capacidade da bateria do novo Nissan Leaf é de 40 kWh, quase o dobro do modelo da primeira geração que era de 24 kWh, pois foram instaladas células com maior densidade de carga, garantindo uma autonomia de 378km para o veículo.

Referente aos tipos e tempo de carregamento, o Nissan Leaf conforme a Figura 19, conta com 3 modalidades, sendo carregamento doméstico normal, onde o veículo leva cerca de 21 horas para ser completamente recarregado. Pode ser recarregado também em postos de carregamento públicos, onde é possível atingir 80% de carga em 40 minutos de carregamento, segundo a fabricante.

A terceira modalidade de carregamento, foi a utilizada nas simulações dos cenários mapeados, que é através de uma *WallBox*, um carregador doméstico com uma potência de 7 kW, que segundo a NISSAN (2018) proporciona um carregamento completo em cerca de 6 horas. Essa modalidade se encaixa no nível 2 de carregamento, que é o mais indicado segundo os autores CASTRO E FERREIRA (2010) no tópico 2.1.4.

Figura 19 – Novo Nissan Leaf



Fonte: NISSAN (2018).

Para calcular a carga adicionada aos grupos de consumo, foi necessário analisar a projeção para o aumento dos veículos elétricos na frota. De acordo com estudos da revista *Bloomberg New Energy Finance* (2018), foi estabelecida a taxa de 11% de inserção de veículos elétricos.

Para aplicar esta taxa projetada na rede de estudo, utilizou-se o número de consumidores apresentados no Quadro 8 da seção 4.1.3, e o resultado pode ser visto no Quadro 9.

Quadro 9 – Quantidade de Consumidores com Veículos Elétricos

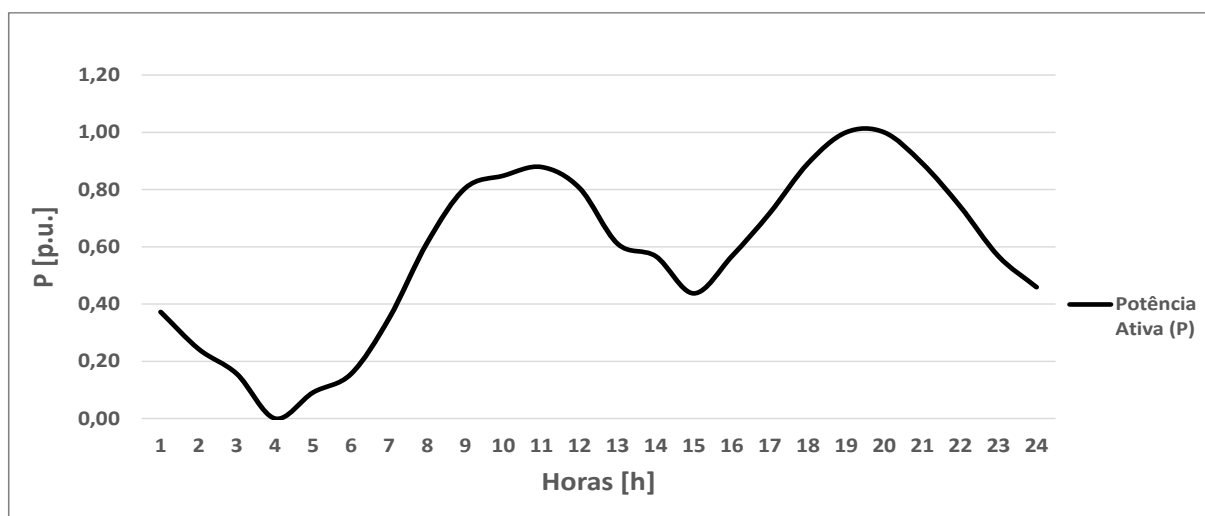
<b>Classes de Consumo</b>	<b>Total S (kVA)</b>	<b>Consumidores</b>	<b>Consumidores com VEs</b>	<b>Potência Ativa dos VEs (kW)</b>	<b>% VEs</b>
Res <= 500	879,12	733	22	146,67	3,0%
Res > 500	552,31	460	87	580,03	19,0%
Comercial	1.290,63	1.076	118	786,71	11,0%
Industrial	1.262,19	1.052	116	773,37	11,0%
<b>Total</b>	<b>3.984,25</b>	<b>3.321</b>	<b>343</b>	<b>2.286,78</b>	<b>11,0%</b>

Fonte: Elaborado pelo Autor.

A quantidade de veículos elétricos foi definida de acordo com a classe consumidora. Os clientes da classe residencial com consumo até 500 kWh receberam apenas 3% de veículos elétricos, enquanto os clientes da classe residencial com consumo acima de 500 kWh receberam 19% de VEs, resultando em uma média de penetração de veículos elétricos para consumidores residenciais de 11%. Para as classes consumidoras comerciais e indústrias, adotou-se a taxa fixa de 11% para cada classe.

A curva típica de carregamento dos veículos elétricos ao longo do dia foi baseada no artigo publicado por IHEKWABA E KIM (2017) e pode ser vista na Figura 20.

Figura 20 – Perfil de Carga de Veículos Elétricos



Fonte: Adaptado de IHEKWABA E KIM (2017).

Nesta curva é possível identificar momentos em que o consumo de potência ativa é maior, ou seja, veículos conectados à rede para recarga, atingindo o valor máximo de 1 p.u. no intervalo das 19h às 20h (horário de ponta).

#### 4.1.5 Utilização dos Veículos Elétricos como Geração Distribuída

Em tópicos anteriores foram abordados alguns impactos que a inserção dos veículos elétricos pode mitigar tanto no meio ambiente, como economicamente. Contudo foi abordado também, a oportunidade destes veículos atuarem como reservas de energia, cumprindo papéis de geradores distribuídos de energia.

De acordo com DELGADO, FEBRERO E SILVA (2017), essa possibilidade se dá através do sistema V2G (*vehicle to grid*). Com essa tecnologia, os veículos elétricos podem atuar como buffers da rede, por permitirem o armazenamento de energia em suas baterias.

Conforme foi abordado pelo INNE (Instituto Nacional de Eficiência Energética), os veículos ficam desligados cerca de 90% do tempo, então poderiam armazenar energia durante horários que não estejam consumindo e devolver essa energia nos períodos de maior necessidade da demanda energética.

Foram mapeados cenários de simulação, onde os veículos inseridos na rede atuam como geradores distribuídos, para explorar essa funcionalidade. Para isso, foi necessário analisar a projeção dos veículos elétricos e foi estabelecida a taxa de 10%



do total de veículos como geração distribuída, com base na projeção publicada em estudo na *GREEN CAR CONGRESS* (2011).

Para este estudo, a atuação do veículo elétrico como geração distribuída ficou restrita ao horário de ponta, entre às 18h e 21 h, conforme a Figura 21, onde a potência ativa demandada é maior, de acordo com as curvas típicas apresentadas na seção 4.1.2.

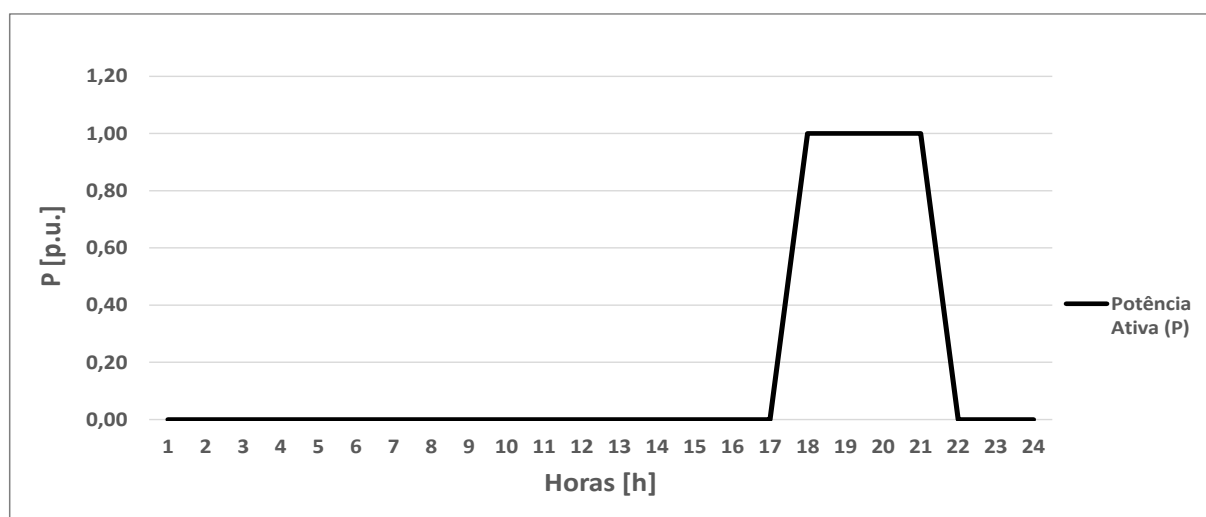
As fontes geradoras de energia foram distribuídas por classes de consumo, de acordo com os percentuais apresentados no Quadro 10, resultando em uma taxa média de 10%.

Quadro 10 – Quantidade de Consumidores com Geração Distribuída

Classes de Consumo	Total S (kVA)	Consumidores	Consumidores com GD	Potência Ativa da GD (kW)	% GD
Res <= 500	879,12	733	22	146,67	3%
Res > 500	552,31	460	87	580,03	19%
Comercial	1.290,63	1076	108	720,04	10%
Industrial	1.262,19	1052	84	560,03	8%
<b>Total</b>	<b>3.984,25</b>	<b>3321</b>	<b>301</b>	<b>2.006,77</b>	<b>10%</b>

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 21 – Veículo Elétrico como Geração Distribuída



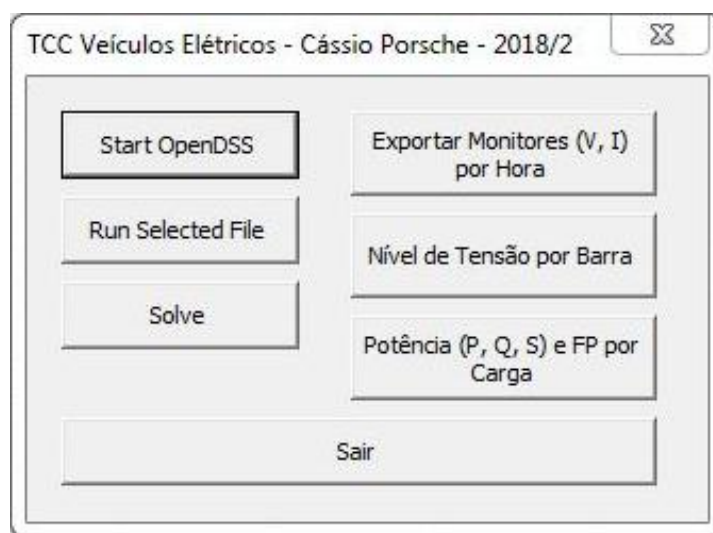
Fonte: Elaborado pelo Autor.

## 4.2 Simulação

Através do *software* escolhido, foi possível criar modelos de redes de distribuição para realização de análises de planejamento e qualidade de energia. Inclusive a ANEEL indica sua utilização às concessionárias para realizar cálculos das perdas e por se tratar de um *software* adquirido sem necessidade de contratação de licença, reforçando a validade da escolha do mesmo para realização deste trabalho.

Com o intuito de otimizar o tratamento de dados obtidos na simulação com o *OpenDSS*, foi desenvolvida uma interface em VB (*Visual Basic*) através do Microsoft Excel, que pode ser vista na Figura 22.

Figura 22 – Interface para coleta e organização dos dados



Fonte: Elaborado pelo Autor.

A interface representada na Figura 22, conta com alguns comandos para facilitar a coleta e organização dos dados no Excel, como *Start OpenDSS*, que inicializa o *OpenDSS*, *Run Selected File*, que executa as linhas de código do *OpenDSS*, *Solve*, que realiza os cálculos necessários, *Exportar Monitores (V, I) por Hora*, que obtém os valores de tensão e corrente ao longo do dia em determinados pontos da rede de estudo, de acordo com os monitores definidos para análise, *Nível de Tensão por Barra*, que obtém dos valores de níveis de tensão por barra da rede de estudo, *Potência (P, Q, S) e FP por Carga*, que obtém dos valores de fluxo de potência para cada carga presente na rede de estudo.

Para a simulação e aplicação da metodologia, foram definidos três cenários distintos, que serão explicados nas próximas seções, considerando a operação dos mesmos em dias úteis e em finais de semana.

#### 4.2.1 Primeiro Cenário – Rede IEEE sem VEs

O primeiro cenário consiste na rede de distribuição pura, ou seja, com as cargas e equipamentos originais do IEEE 123 barras, conforme Anexo A. Neste cenário não há veículos elétricos atuando nem como carga nem como geração distribuída.

A partir deste cenário, é possível identificar os pontos mais críticos do sistema e então realizar as análises propostas na metodologia.

#### 4.2.2 Segundo Cenário – Rede IEEE com VEs

No segundo cenário inseriu-se os veículos elétricos, conforme Anexo B, na rede de distribuição, de forma aleatória, seguindo os percentuais definidos na seção 4.1.4. Com o acréscimo da demanda de potência ativa no sistema, repetiu-se a análise nos pontos críticos identificados no primeiro cenário e observou-se o comportamento da rede.

#### 4.2.3 Terceiro Cenário – Rede IEEE com VEs e GD

O terceiro cenário tem como base a rede de distribuição do cenário anterior, porém com o incremento de consumidores atuando como geração distribuída, de acordo com Anexo C, em pontos aleatórios do sistema, seguindo as taxas definidas na seção 4.1.5. Neste cenário é possível observar o efeito dos veículos elétricos operando em conjunto, como carga e geração distribuída.

### 4.3 Análise dos Resultados

Para avaliação da rede de distribuição em estudo, foram utilizadas as ferramentas *OpenDSS* e *Excel*, conforme citado na seção 4.2. Através destas ferramentas, foi possível obter e tratar as informações de fluxo de potência da rede de distribuição e então realizar as análises de nível de tensão, carregamento, fator de potência, perdas e potência demandada do alimentador.

### 4.3.1 Níveis de Tensão

Para análise do nível de tensão, foram utilizados os limites estabelecidos no módulo 8 do PRODIST. Com base no Quadro 11, é possível identificar os limites de transgressão dos níveis de tensão, sendo as tensões de atendimento classificadas como adequada, precária e crítica. A tensão de referência deste estudo é 13,8 kV (1 p.u.).

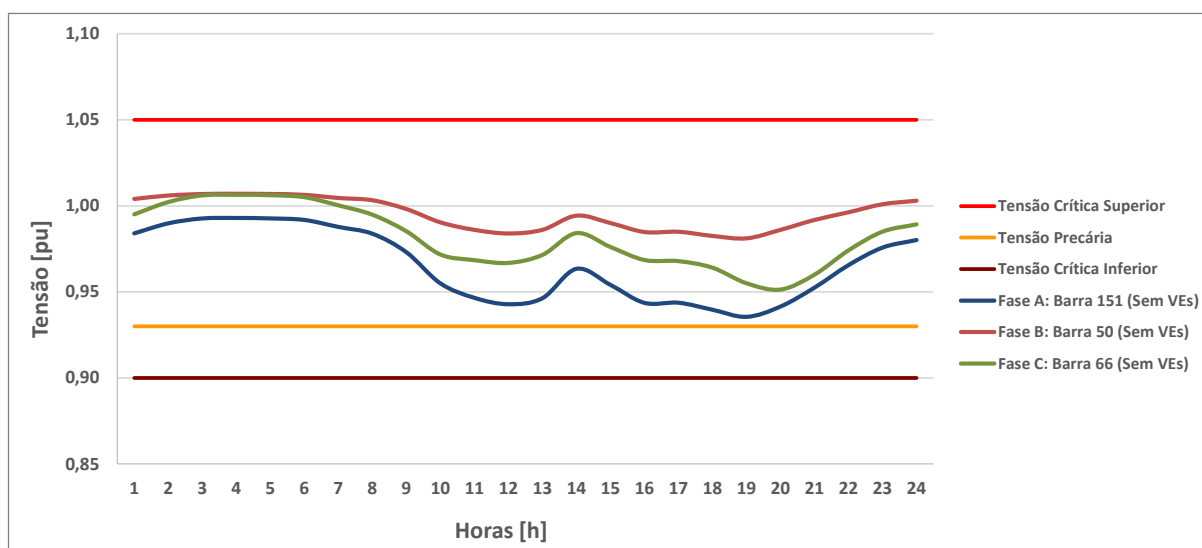
Quadro 11 – Classificação da Tensão de Atendimento

Tensão de Atendimento (TA)	Faixa de Variação da Tensão de Leitura (TL) em Relação à Tensão de Referência (TR)
Adequada	$0,93 TR \leq TL \leq 1,05 TR$
Precária	$0,90 TR \leq TL < 0,93 TR$
Crítica	$TL < 0,90 TR$ ou $TL > 1,05 TR$

Fonte: ANEEL - PRODIST, Módulo 8 (2018).

Para início da análise, utilizou-se o primeiro cenário, onde foram identificados os níveis de tensão mais críticos do sistema por fase. As barras com níveis de tensão mais críticos podem ser identificadas nas Figura 23 e 24, sendo dia útil e fim de semana respectivamente, e servirão de referência para diagnóstico dos demais cenários propostos neste trabalho.

Figura 23 – Fases mais críticas do sistema em dia útil

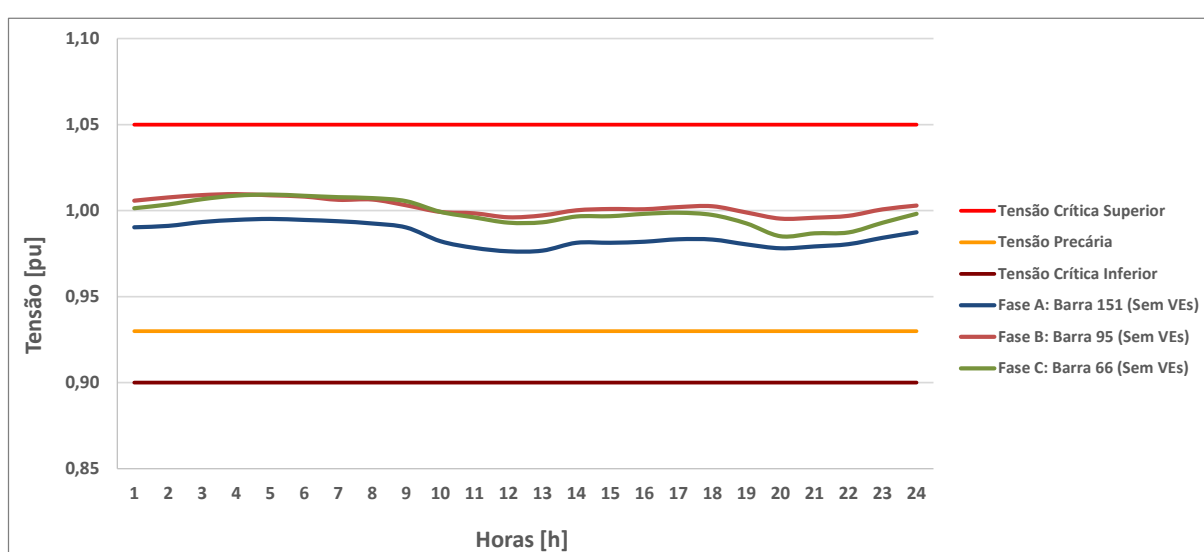


Fonte: Elaborado pelo Autor.

Na Figura 23 é possível identificar os menores níveis de tensão para cada fase, sendo às 19h o horário mais crítico para as fases A (0,94 p.u.) e B (0,98 p.u.) e às 20h para a fase C (0,95 p.u.). As três barras ficaram dentro dos limites adequados de tensão durante as 24 horas do dia.

A mesma análise foi realizada para o fim de semana, durante 24 horas e os níveis também se mantiveram dentro da faixa de tensão adequada, conforme Figura 24.

Figura 24 – Fases mais críticas do sistema em fim de semana



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Os menores níveis de tensão em dias úteis foram identificados nas barras 151, 50 e 66 para as fases A, B e C, respectivamente. Já para os fins de semana, houve registro de menor nível de tensão nas barras 151 (fase A), 95 (fase B) e 66 (fase C). A diferença no perfil de tensão entre as fases deve-se à distribuição desequilibrada das cargas na rede de distribuição.

Para cada barra identificada nas Figuras 23 e 24, foram inseridos os demais cenários e analisado o comportamento dos níveis de tensão por fase.

Na Figura 25 são exibidos os níveis de tensão da fase A da barra 151 para dia útil, considerando os três cenários propostos: rede de distribuição sem veículos elétricos, com veículos elétricos e com veículos elétricos mais geração distribuída.

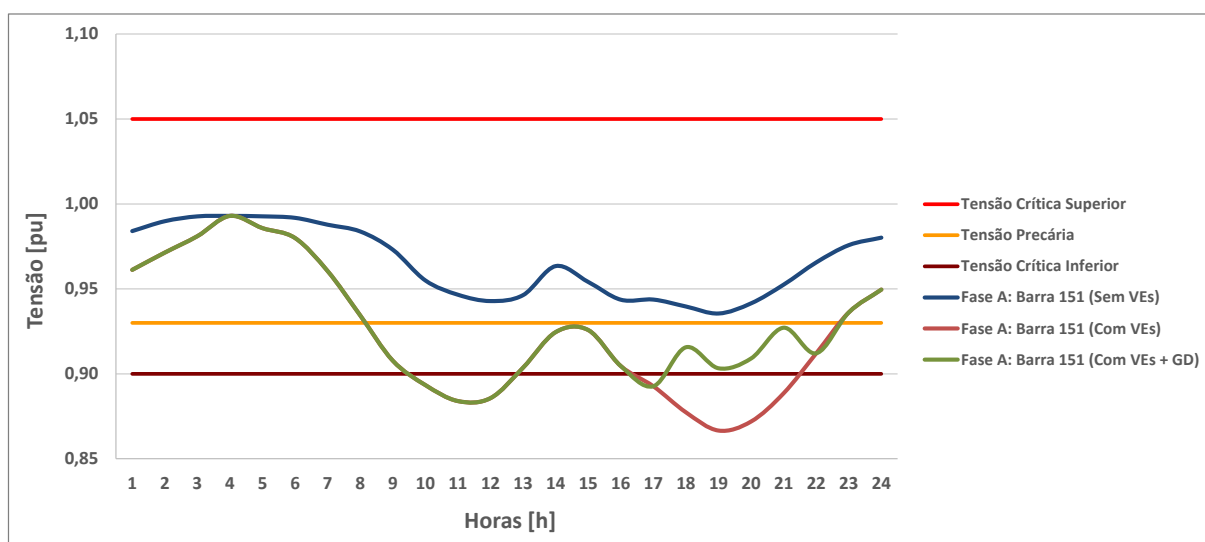
Analisando a Figura 25, é possível identificar a variação do nível de tensão para cada cenário em estudo. Quando não há atuação de veículos elétricos na rede de distribuição, o nível de tensão fica dentro dos níveis adequados durante as 24 horas

do dia. Quando é projetado o segundo cenário, cuja mudança é a penetração dos veículos elétricos, ocorre uma queda repentina no intervalo das 6h às 11h no nível de tensão da fase A da barra 151, atingindo o nível crítico de tensão.

A situação citada se mantém até às 13h. Como neste horário a demanda de energia dos consumidores é menor, o nível de tensão aumenta e fica na faixa de tensão precária. À medida que se aproxima do horário de ponta, onde há o maior consumo de energia, o nível de tensão cai, registrando o valor mínimo de 0,87 p.u. às 19h e se mantém na região crítica até às 21h. Após este horário, a potência demandada é menor e por consequência o nível de tensão aumenta. Já às 23h é possível notar que o nível retorna ao estágio adequado de tensão.

Avaliando o terceiro cenário na Figura 25, o nível de tensão se mantém o mesmo até às 17h. A partir deste horário, como proposto neste trabalho, há a atuação da geração distribuída, fornecendo potência ativa para a rede elétrica e então melhorando os níveis de tensão do sistema. Durante o horário de ponta é possível notar que não há mais transgressão crítica na rede de distribuição.

Figura 25 – Nível de tensão da fase A da Barra 151 para dia útil



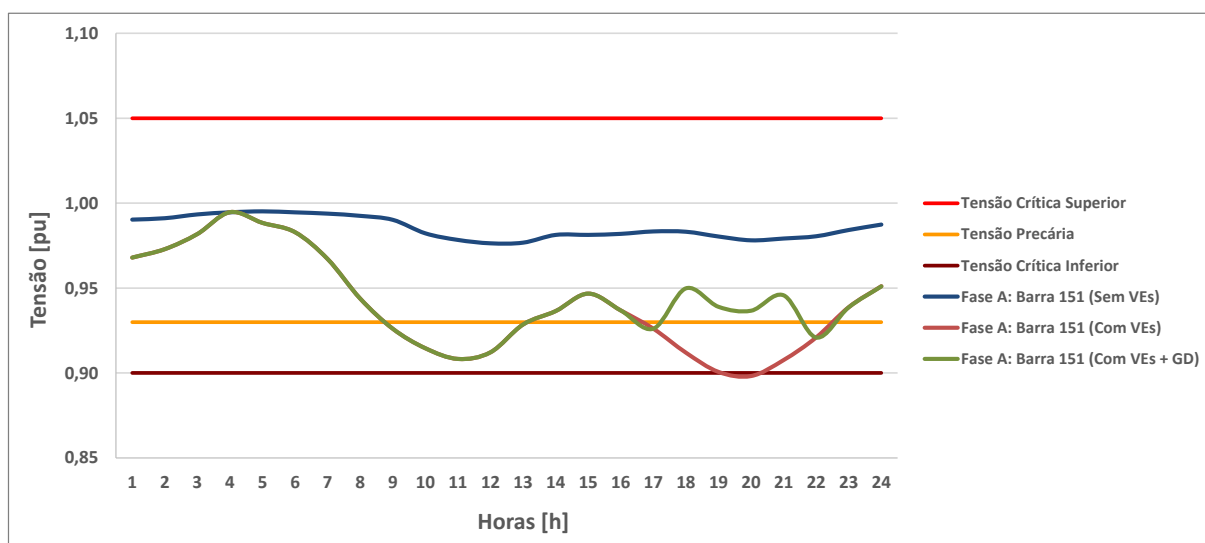
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Os três cenários foram simulados para fins de semana, durando as 24 horas do dia, para a fase A da barra 151 e os resultados podem ser vistos na Figura 26. Com a rede de distribuição operando somente com a carga de consumidores residenciais, industriais e comerciais, o nível de tensão se mantém estável durante as 24h do dia.

Com a inserção de veículos elétricos no segundo cenário, é possível observar a transgressão precária próximo ao meio-dia e durante o horário de ponta, onde atinge o nível crítico de tensão apenas em uma hora do dia, às 20h.

Ao simular o terceiro cenário, com a inserção da geração distribuída durante o horário de ponta, o nível de tensão aumenta, retornando para a região adequada durante este intervalo de tempo. Isto ocorre devido à injeção de potência ativa na rede elétrica pelas fontes geradoras.

Figura 26 – Nível de tensão da fase A da Barra 151 para fim de semana



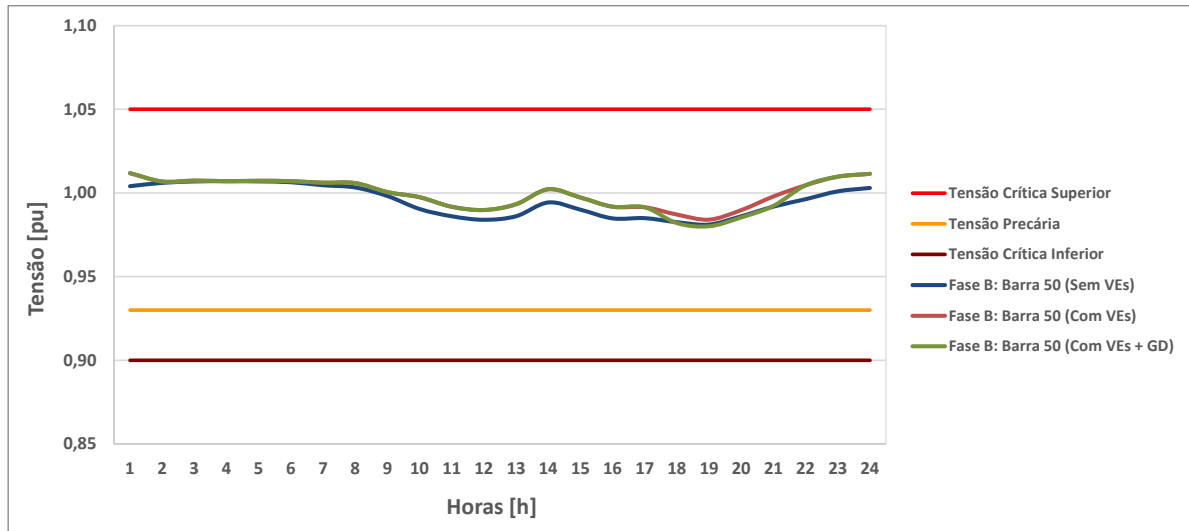
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Na Figura 27 são apresentados os níveis de tensão da fase B da barra 50 para dia útil, considerando a aplicação dos três cenários propostos no tópico 4.2.

Nesta barra, para os diferentes cenários simulados, os níveis de tensão não possuem grandes oscilações nas 24 horas do dia, pois as cargas conectadas nesta barra não demandam grande energia.

Os valores oscilam próximo a 1 p.u., tendo o valor mínimo registrado às 19h pelo terceiro cenário (0,98 p.u.), porém sem transgressão de tensão em nenhum horário do dia, permanecendo o tempo integral dentro da faixa adequada.

Figura 27 – Nível de tensão da fase B da Barra 50 para dia útil

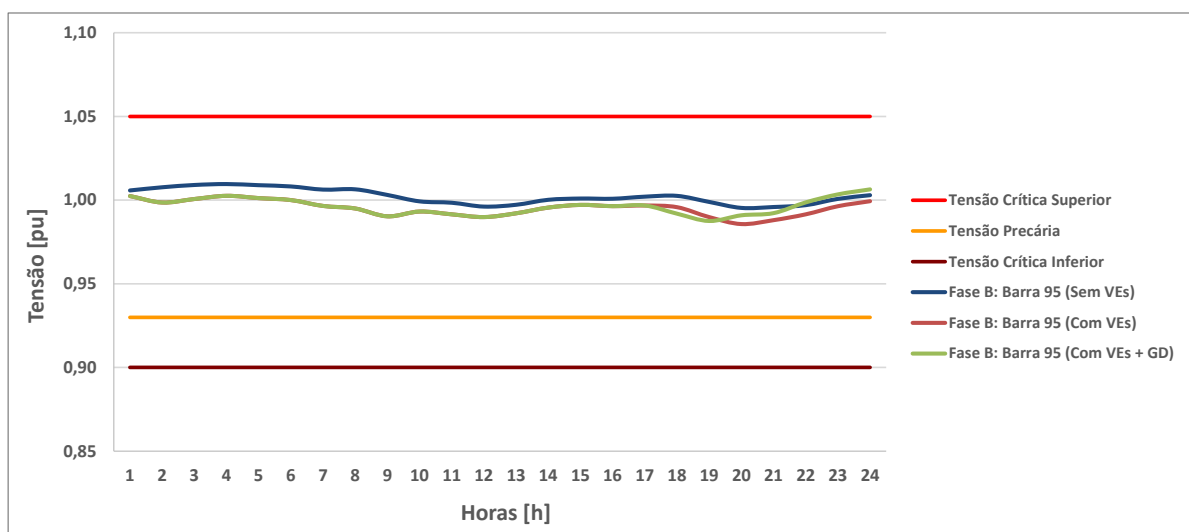


Fonte: Elaborado pelo Autor.

A mesma análise foi realizada para o fim de semana, porém a barra mais crítica para a fase B foi a 95, conforme Figura 28. Os valores dos níveis de tensão oscilaram próximos a 1 p.u durante as 24 horas do dia, não havendo transgressão de tensão em nenhum momento.

Para a fase B, tanto em dias úteis como em fins de semana, a inserção de veículos elétricos, bem como a aplicação da geração distribuída, não resultou em grandes alterações na rede de distribuição, permanecendo dentro dos níveis adequados.

Figura 28 – Nível de tensão da fase B da Barra 95 para fim de semana



Fonte: Elaborado pelo Autor.



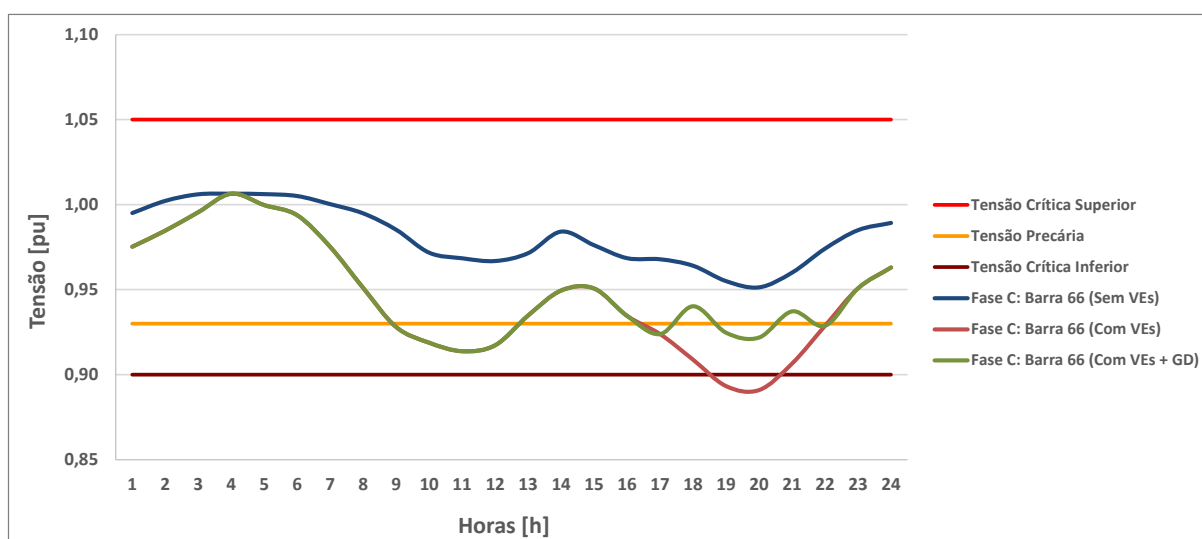
Na Figura 29 são exibidos os níveis de tensão da fase C da barra 66 para dia útil, considerando a operação dos três cenários propostos neste trabalho. Analisando a figura, observa-se um comportamento similar a fase A da barra 151 para dia útil.

No primeiro cenário, onde não há veículos elétricos conectados à rede elétrica, o nível de tensão permanece dentro dos limites adequados durante as 24 horas do dia. Para o segundo cenário, com a penetração de veículos elétricos na rede de distribuição, ocorre a transgressão precária de tensão das 9h às 12h. Após às 12h, o nível de tensão retorna para a região adequada, onde permanece até às 17h.

Após às 17h, há o aumento na demanda de energia, e com isso o nível de tensão cai, atingindo a região crítica no intervalo das 19h às 20h. Após este horário, a potência demandada diminui e o nível de tensão aumenta. Às 22h já é possível notar que o nível retorna ao estágio adequado de tensão.

Para o terceiro cenário, há variação no nível de tensão durante o horário de ponta, onde a geração distribuída contribui para que os níveis de tensão não atinjam a região crítica de fornecimento. Com a geração distribuída, o nível de tensão, durante o intervalo das 17h às 22h oscila entre as regiões precárias e adequadas de tensão, pois há a injeção de potência ativa na rede elétrica.

Figura 29 – Nível de tensão da fase C da Barra 66 para dia útil



Fonte: Elaborado pelo Autor.

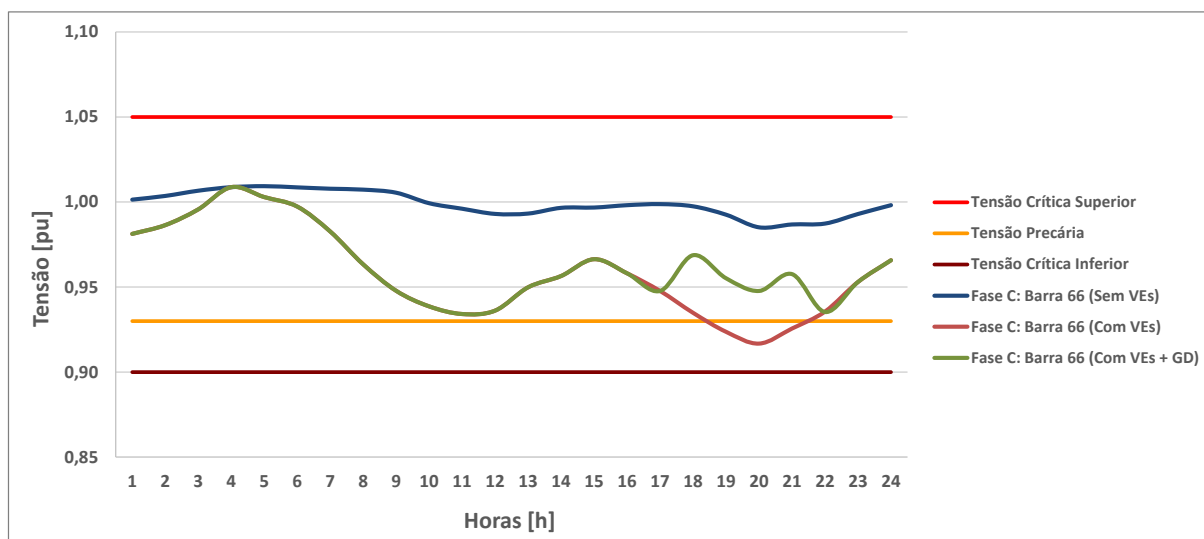
Os três cenários foram simulados para fins de semana, durando as 24 horas do dia, para a fase C da barra 66 e os resultados podem ser vistos na Figura 30. Para

o primeiro cenário, não há grandes oscilações e os valores de tensão permanecem dentro da região adequada de fornecimento durante as 24h do dia.

Para o segundo cenário, com a inserção de veículos elétricos, a demanda de energia aumenta e é possível observar a transgressão precária de tensão no intervalo das 19h às 21h, onde atinge o valor mínimo de 0,92 p.u.

Com a inserção da geração distribuída, como alternativa para suprir as necessidades da rede elétrica durante o horário de ponta, pode-se notar que houve uma melhora significativa no nível de tensão, mantendo o mesmo dentro da faixa adequada durante as 24 horas do dia.

Figura 30 – Nível de tensão da fase C da Barra 66 para fim de semana

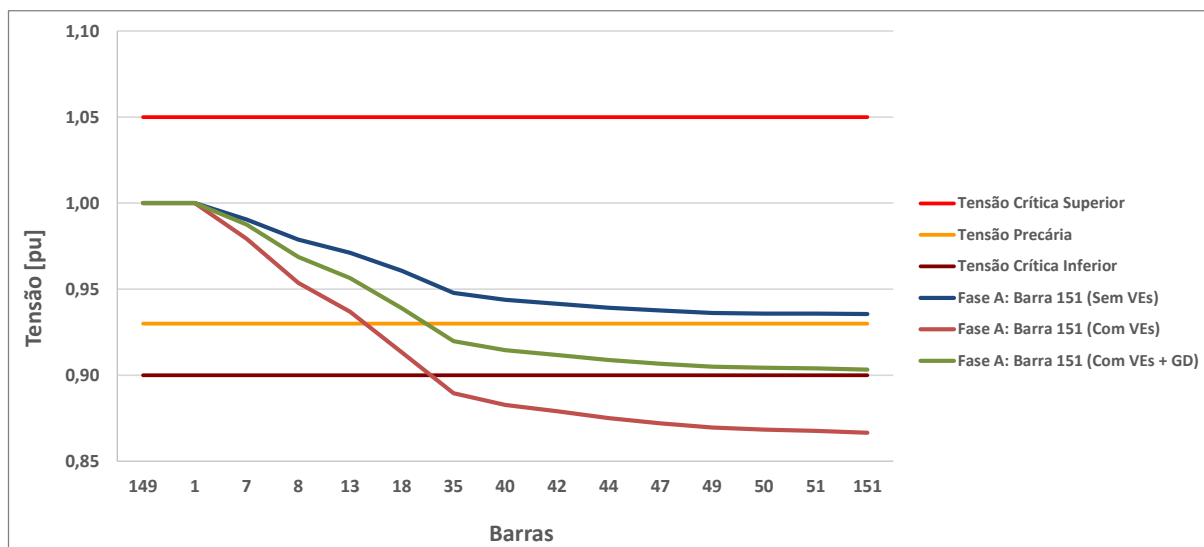


Fonte: Elaborado pelo Autor.

As barras críticas identificadas através da análise dos três cenários foram exploradas e explicadas nas figuras anteriores. Para compreender a variação da tensão ao longo da rede de distribuição até chegar na barra crítica, serão apresentados os perfis de tensão nas Figuras 31, 32, 33, para os dias úteis e nas Figuras 34, 35 e 36, para os fins de semana.

O perfil de tensão da fase A da barra 151 para dia útil é apresentada na Figura 31, onde o menor nível de tensão foi registrado às 19 horas.

Figura 31 – Perfil de tensão da fase A da Barra 151 para dia útil



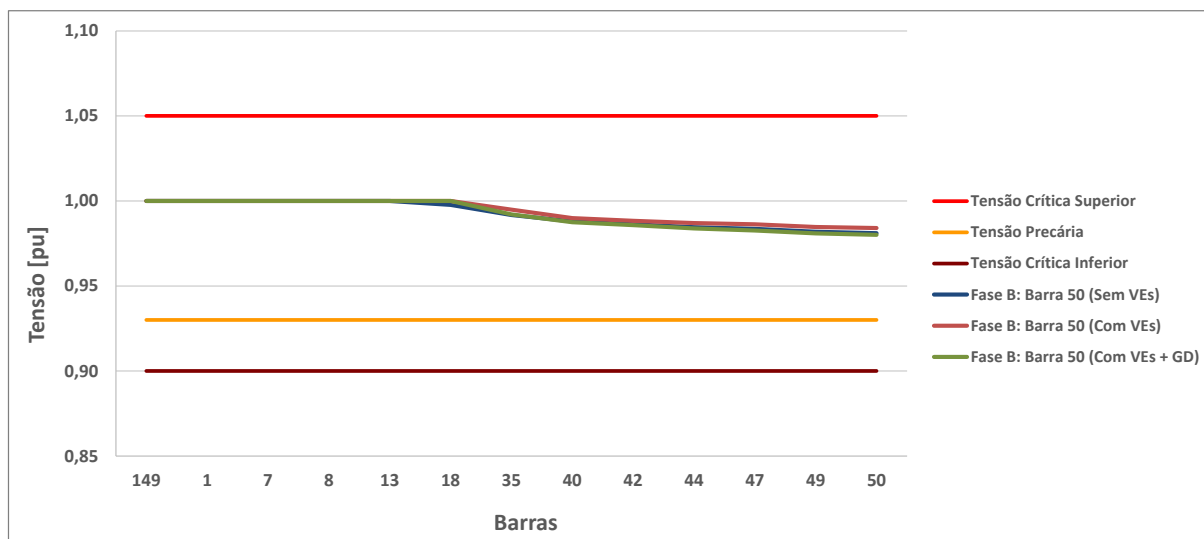
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Na Figura 31, é possível avaliar o comportamento do nível de tensão durante toda a extensão de rede desde a subestação até a barra 151, onde foi identificada como barra crítica para a fase A. No primeiro cenário, observa-se que o nível de tensão fica dentro dos limites adequados durante todo o trajeto.

Com a inserção de veículos elétricos no segundo cenário, é possível observar que a partir da barra 18, o nível de tensão é precário e se torna crítico no trecho entre as barras 18 e 35. Com a geração distribuída atuando no terceiro cenário, observa-se que não há mais transgressão crítica de tensão ao longo da rede. O nível de tensão é precário a partir da barra 35 e permanece nesta região até o final do trecho de rede, identificado como barra 151.

O perfil de tensão da fase B da barra 50 para dia útil é apresentado na Figura 32, onde o menor nível de tensão foi registrado às 19 horas.

Figura 32 – Perfil de tensão da fase B da Barra 50 para dia útil



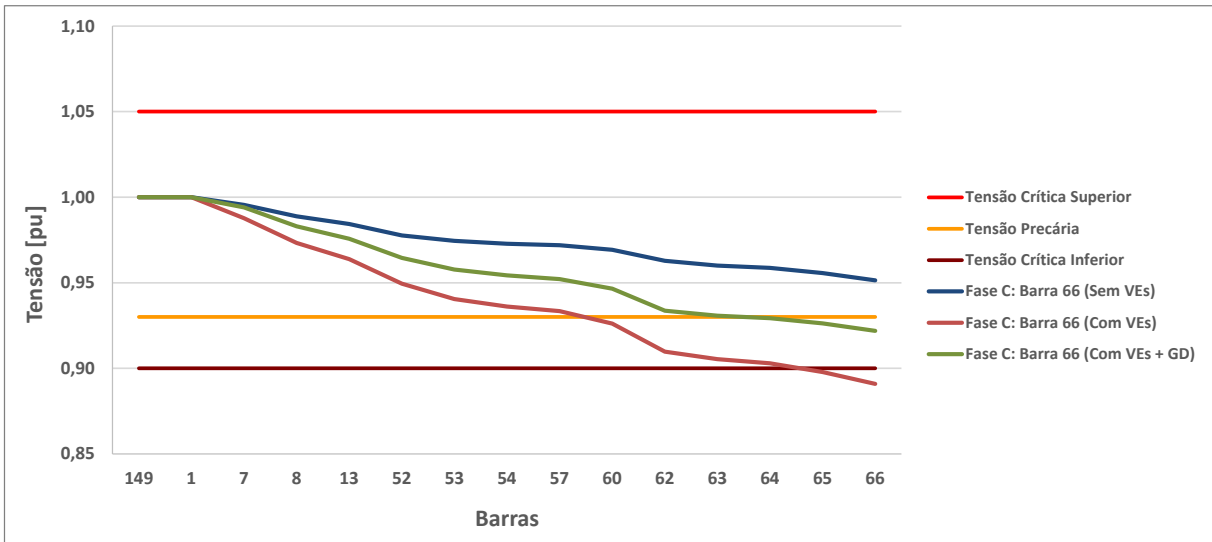
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Através da análise da Figura 32, é possível verificar que ao longo da rede de distribuição não há grande variação do nível de tensão nos três cenários propostos, até chegar à barra 50. Para esta barra, o nível de tensão se mantém dentro dos níveis adequados, conforme estabelecido pela ANEEL.

Na Figura 33, é apresentado o perfil de tensão da fase C da barra 66 para dia útil, onde o menor nível de tensão foi registrado às 20 horas. Para esta fase, o nível de tensão do primeiro cenário não ultrapassa nenhum dos limites de tensão precária ou crítica durante o trajeto da subestação até a barra 66.

No segundo cenário, com a penetração de veículos elétricos, o nível de tensão para a fase C é precário a partir da barra 60 e torna-se crítico no trecho entre as barras 64 e 65. Com as fontes geradoras operando no terceiro cenário, os níveis de tensão melhoram e é possível observar que há apenas transgressão precária de tensão a partir da barra 64, atingindo 0,92 p.u no final da rede (barra 66).

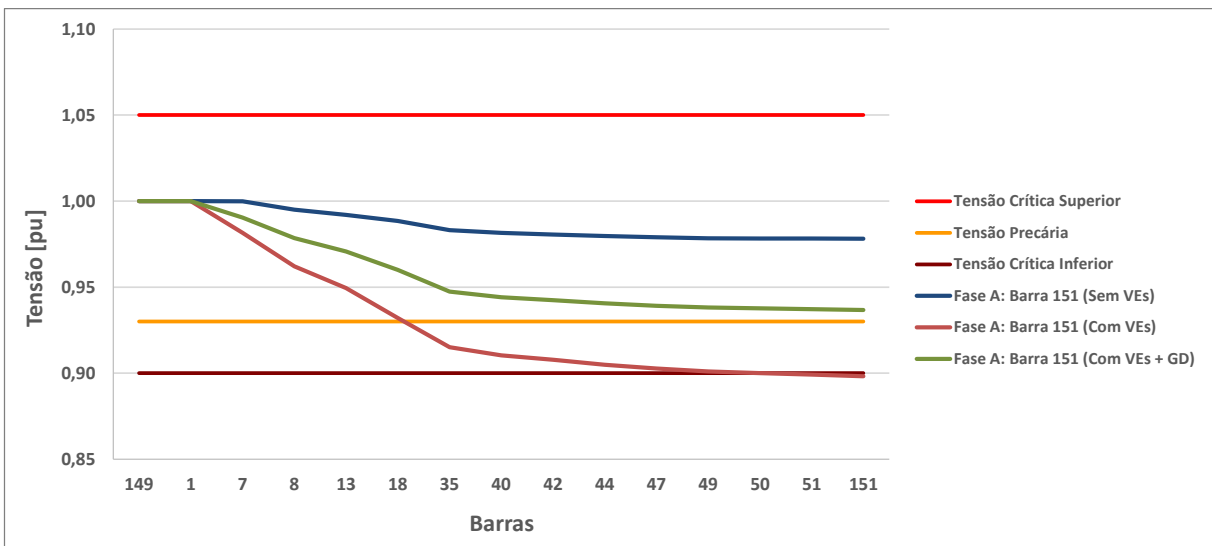
Figura 33 – Perfil de tensão da fase C da Barra 66 para dia útil



Fonte: Elaborado pelo Autor.

O perfil de tensão da fase A da barra 151 para fins de semana é apresentado na Figura 34, onde o menor nível de tensão foi registrado às 20 horas.

Figura 34 – Perfil de tensão da fase A da Barra 151 para fim de semana



Fonte: Elaborado pelo Autor.

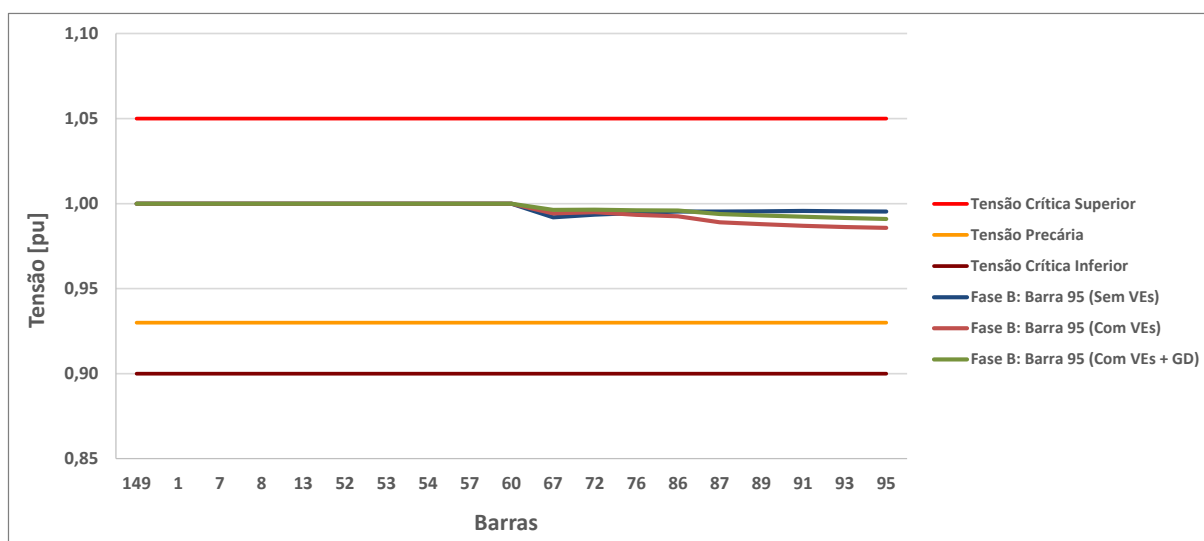
Conforme a Figura 34, o nível de tensão para a Fase A da barra 151 permanece dentro dos valores adequados de tensão durante toda a extensão de rede para o primeiro cenário em estudo. Para o segundo cenário, com o aumento da demanda de energia ativa pelos veículos elétricos, a rede elétrica passa a ter nível de tensão

precário a partir da barra 18 e chega a atingir o limite da faixa de tensão crítica (0,90 p.u.) no final da rede.

A melhora no sistema é identificada no terceiro cenário, onde há injeção de potência ativa na rede, pelas fontes distribuídas. Neste cenário, é possível observar que o nível de tensão fica dentro do limite adequado para todo o caminho elétrico, desde a subestação até a barra 151.

Na Figura 35, é apresentado o perfil de tensão da fase B da barra 95 para o fim de semana, onde o menor nível de tensão foi registrado às 20 horas.

Figura 35 – Perfil de tensão da fase B da Barra 95 para fim de semana

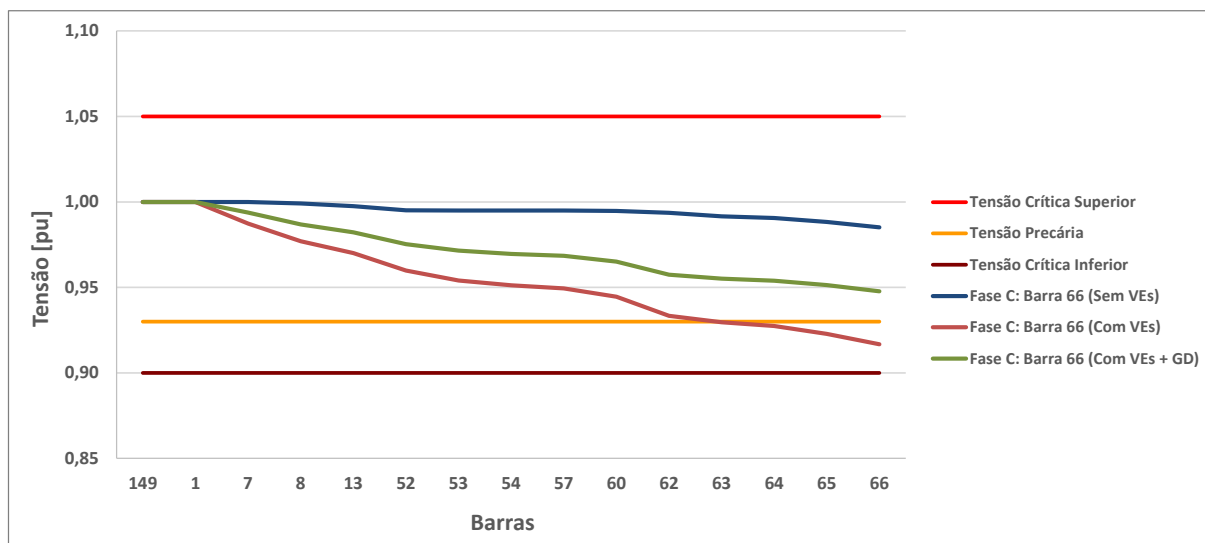


Fonte: Elaborado pelo Autor.

Nesta figura, o comportamento do nível de tensão para a fase B é semelhante ao perfil analisado para dias úteis, onde nos três cenários em estudo não há grande variação de tensão. A diferença visualizada entre o nível de tensão do cenário sem VEs comparado ao segundo cenário, deve-se à inserção de veículos elétricos, bem como à inserção de fontes geradoras de energia nas barras 86 e 95 e proximidades. Para toda a extensão analisada, o nível de tensão fica dentro da faixa adequada.

O perfil de tensão da fase C da barra 66 para fim de semana é apresentado na Figura 36, onde o menor nível de tensão foi registrado às 20 horas.

Figura 36 – Perfil de tensão da fase C da Barra 66 para fim de semana



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Conforme a Figura 36, o nível de tensão do primeiro cenário proposto não sofre grandes alterações durante o trajeto entre a subestação e a barra 66, onde permanece dentro da faixa de tensão adequada e atinge o valor mínimo de 0,98 p.u.

No segundo cenário em estudo, com o aumento na demanda de potência ativa do sistema, pode-se observar que há transgressão precária de tensão a partir da barra 63, até chegar ao fim da linha, na barra 66.

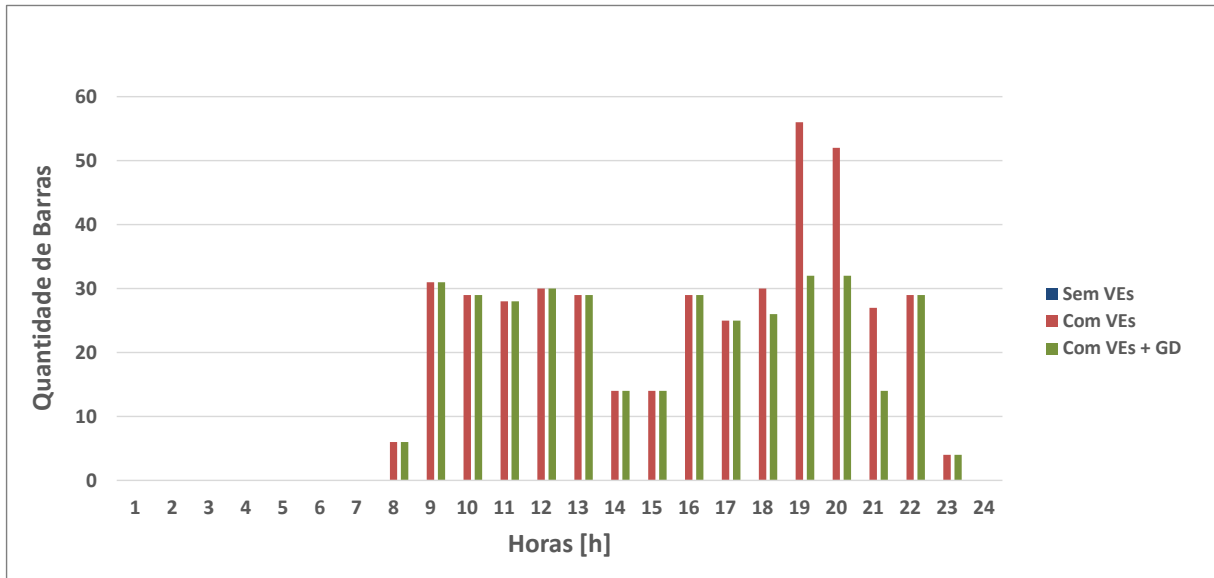
O sistema retorna ao nível de tensão adequado quando há operação das GDs ao longo da rede. No terceiro cenário, a injeção de potência ativa pelas fontes geradoras é fundamental para o atendimento nos níveis adequados de tensão estabelecidos pela ANEEL.

Além da análise de nível e perfil de tensão das três fases em cada um dos três cenários propostos neste estudo, avaliou-se a quantidade de transgressões precárias e críticas durante as 24 horas de operação, tanto para dias úteis quanto para fins de semana. Esta avaliação é apresentada nas Figuras 37, 38, 40 e 41 e os pontos onde ocorreram as transgressões na rede de distribuição estão exibidos nas Figuras 39 e 42.

Conforme a Figura 37, é possível identificar que as transgressões precárias em dias úteis ocorrem em maior quantidade entre às 19 e 20h, onde ocorre a inserção de veículos elétricos na rede de distribuição. Nestes horários, a rede em estudo apresenta mais de 50 barras com nível de tensão precária.

Com a projeção do terceiro cenário, que consiste na atuação da geração distribuída no horário de ponta, a quantidade de barras com transgressão precária reduz em torno de 40% com relação ao segundo cenário, no horário de ponta.

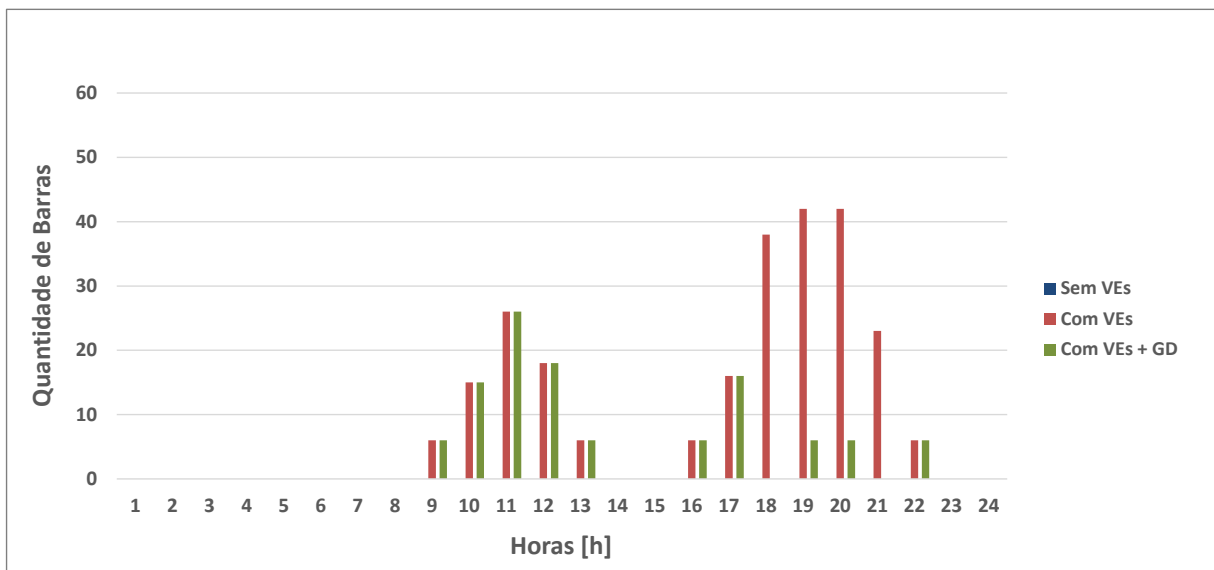
Figura 37 – Transgressão Precária em Dia Útil



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Para a Figura 38, onde são apresentadas as barras com transgressão crítica durante os dias úteis, observa-se que o período onde contém barras nesta situação varia entre o horário das 9 e 22 horas.

Figura 38 – Transgressão Crítica em Dia Útil



Fonte: Elaborado pelo Autor.

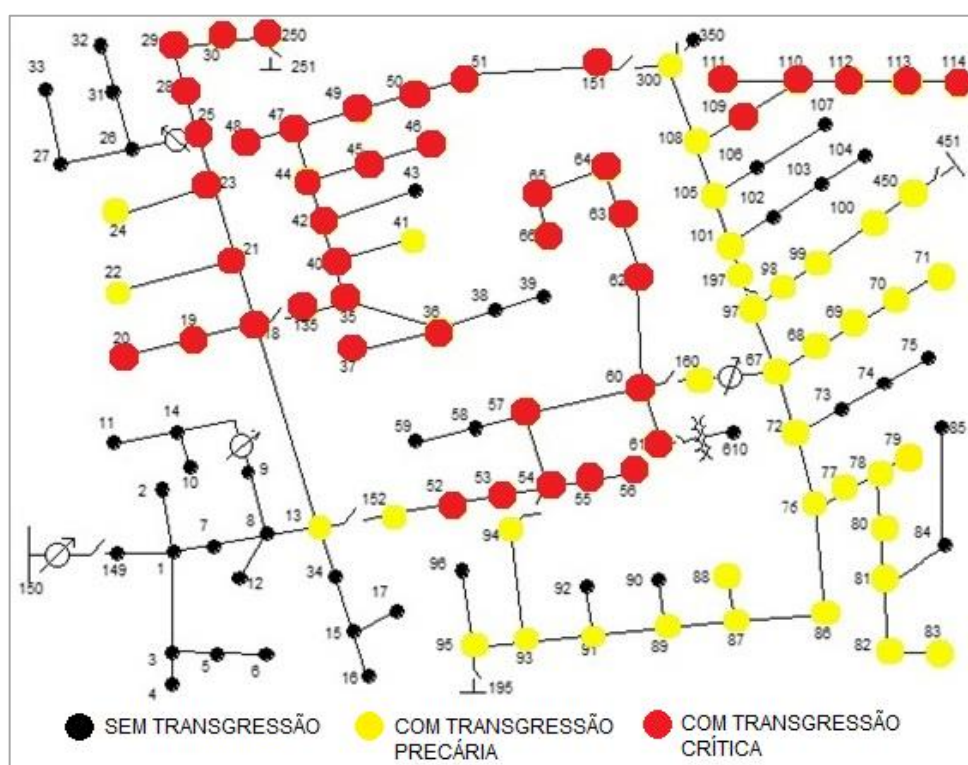


Para o primeiro cenário não há identificação de nenhuma transgressão crítica de tensão. No segundo cenário, a quantidade de barras críticas no período da manhã para fins de semana, chega a atingir 26 barras às 11h. No intervalo das 18 às 20 horas, a demanda de energia da rede é maior, o que resulta no aumento de barras com transgressão crítica de tensão, chegando a 42 barras.

Colocando em operação o terceiro cenário, a quantidade de barras com transgressão crítica reduz em torno de 85% no horário de ponta, com relação ao cenário anterior e pode-se observar que às 18 horas, onde havia 38 barras com tensão crítica, não há mais nenhuma. Isto se deve ao auxílio das gerações distribuídas no suprimento de energia do sistema.

Na Figura 39, é exibida a rede de distribuição em estudo com a sinalização por cores, das barras onde ocorrem as transgressões de tensão, em dias úteis.

Figura 39 – Transgressões Precárias e Críticas em Dias Úteis



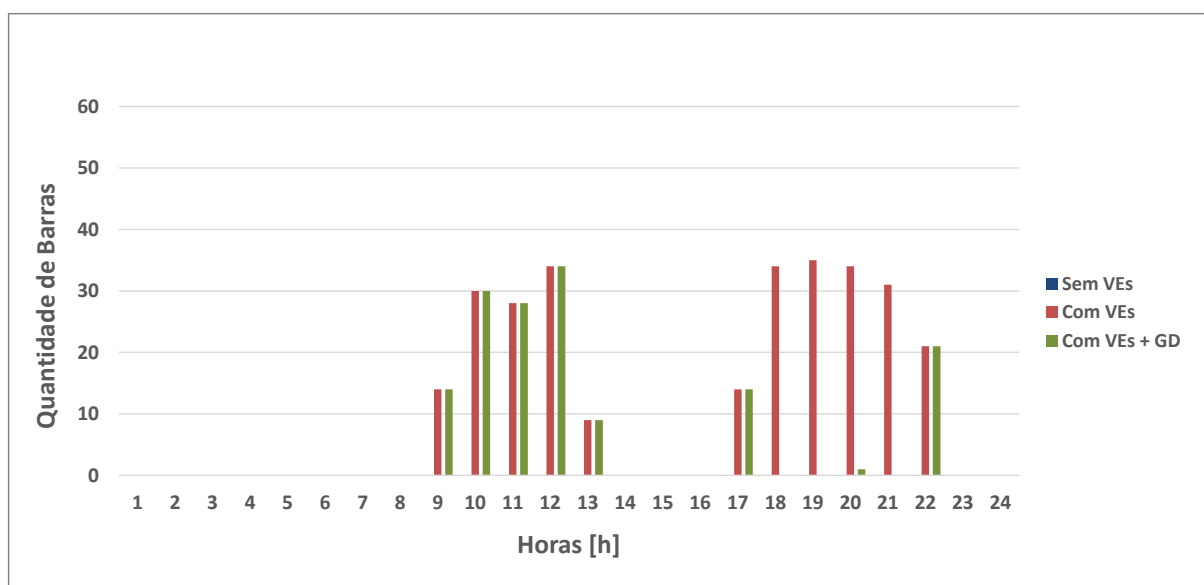
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Sinalizadas em amarelo, estão as barras com transgressões precárias, sendo predominante na região industrial conforme a Figura 18, presente no tópico 4.1.2. Em vermelho, podem ser visualizadas as barras com nível de tensão crítico, nas regiões

onde estão concentrados os consumidores comerciais e residenciais. Para esta análise foi visto o comportamento das barras ao longo das 24 horas do dia.

Através da Figura 40, observa-se que a transgressão precária de tensão ocorre entre os horários das 9 às 13 horas e das 17 às 22 horas, nos fins de semana.

Figura 40 – Transgressão Precária em Fim de Semana



Fonte: Elaborado pelo Autor.

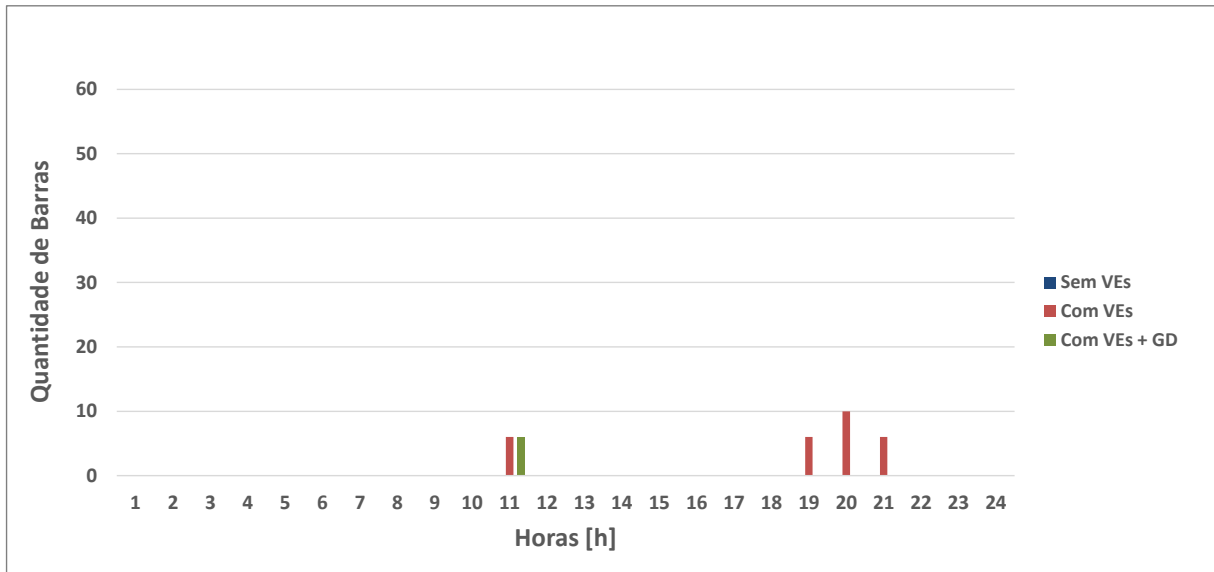
A operação da rede de distribuição sem veículos elétricos não apresenta resultados de tensão precária no sistema. Conforme são inseridos os veículos para operar na rede em estudo, há um aumento na demanda de energia e percebe-se o carregamento da rede através do aparecimento de barras com tensões precárias. Para o período da manhã, o valor máximo de barras com transgressões é de 34 às 12h, e no período de ponta às 19h chega a 35.

À medida que as GDs são inseridas no horário de ponta, a quantidade de barras com transgressão precária é praticamente zero, havendo somente 1 barra com nível precário às 20h.

Na Figura 41 são avaliadas as barras com nível crítico de tensão em fins de semana. Pode-se observar que a quantidade máxima de transgressões do segundo cenário é de 10 barras às 20h.

No terceiro cenário não há mais transgressão crítica de tensão no horário de ponta devido à operação das GDs no sistema, que auxiliam o suprimento de energia demandada.

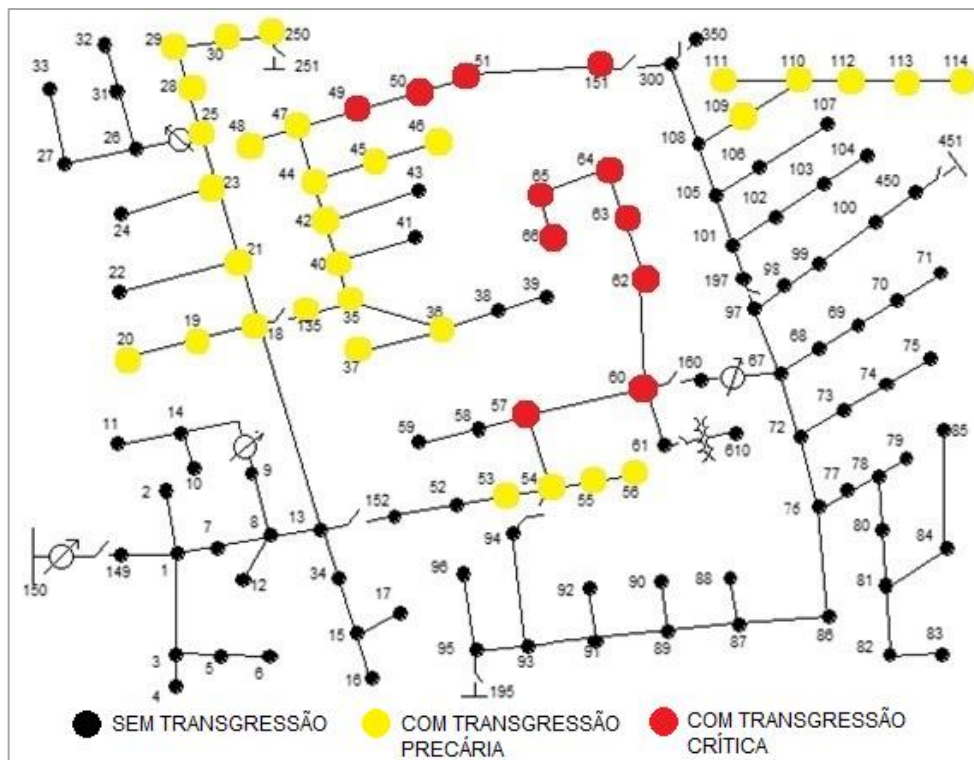
Figura 41 – Transgressão Crítica em Fim de Semana



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Na Figura 42, é exibida a rede de distribuição em estudo com a sinalização por cores das barras onde ocorrem as transgressões de tensão em fins de semana.

Figura 42 – Transgressões Precárias e Críticas em Fins de Semana



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Sinalizadas em amarelo estão as barras com transgressões precárias, sendo predominante na região comercial conforme tópico 4.1.2. Em vermelho, podem ser visualizadas as barras com nível de tensão crítico nas regiões onde encontram-se consumidores comerciais e residenciais. Para esta análise foi visto o comportamento das barras ao longo das 24 horas do dia.

#### 4.3.2 Carregamento

Para a análise do carregamento da rede em estudo, foram coletadas as informações dos condutores de cada linha e então avaliada a corrente que circula pelos mesmos.

Considerando a operação dos três cenários durante as 24 horas do dia, a linha por onde circulam as maiores correntes é a que está conectada diretamente no alimentador do sistema IEEE 123 barras, denominada de linha 115.

Através da identificação da linha e de acordo com o IEEE, o condutor utilizado na linha em análise é denominado de Linnet. No Quadro 12 são apresentadas as características do condutor, a fim de avaliar a capacidade de carga e as necessidades de intervenções.

Quadro 12 – Condutor Linnet – Conforme NBR 7270

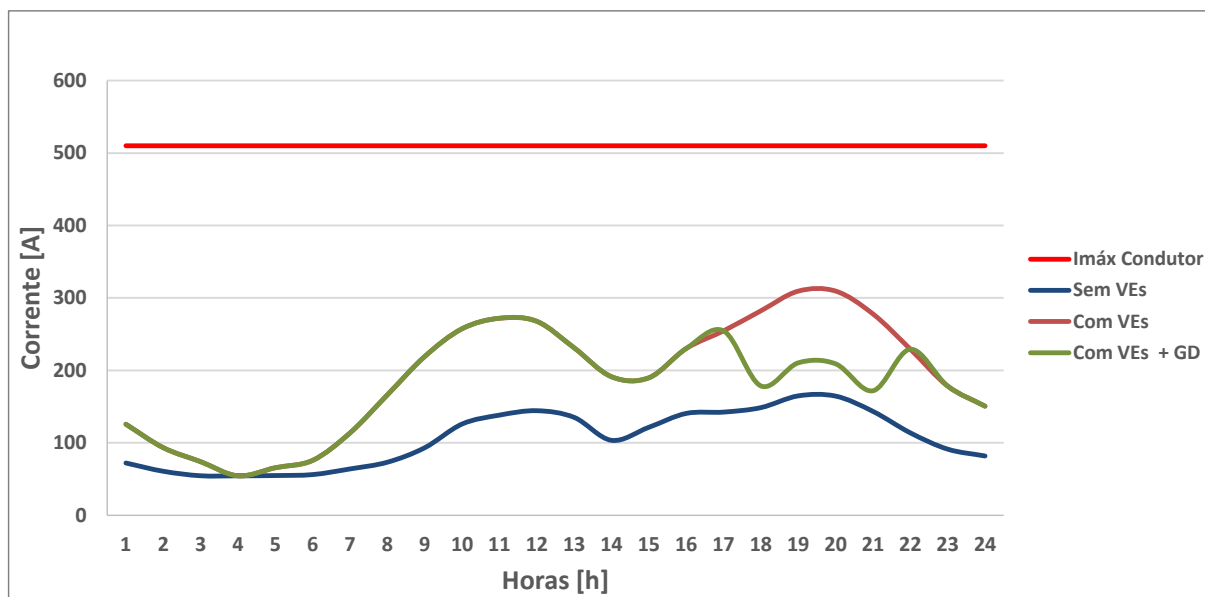
Denominação	AWG	Porcentagem de Massa Total		Carga de Ruptura [kN]	Capacidade de Corrente [A]
Linnet	336,4	68,6	31,4	62,73	510

Fonte: General Cable Brasil (2016).

Com base na capacidade de condução de corrente elétrica deste condutor, que é de 510 A, serão realizadas as análises de carregamento da rede de distribuição em estudo.

Para a comparação entre a corrente que circula nas fases A, B e C e o condutor Linnet, foram obtidos os valores de corrente de cada hora do dia. Os resultados para dias úteis são apresentados nas Figuras 43, 44, 45 e para fins de semana nas Figuras 46, 47 e 48.

Figura 43 – Corrente da Fase A da Linha 115 em Dia Útil



Fonte: Elaborado pelo Autor.

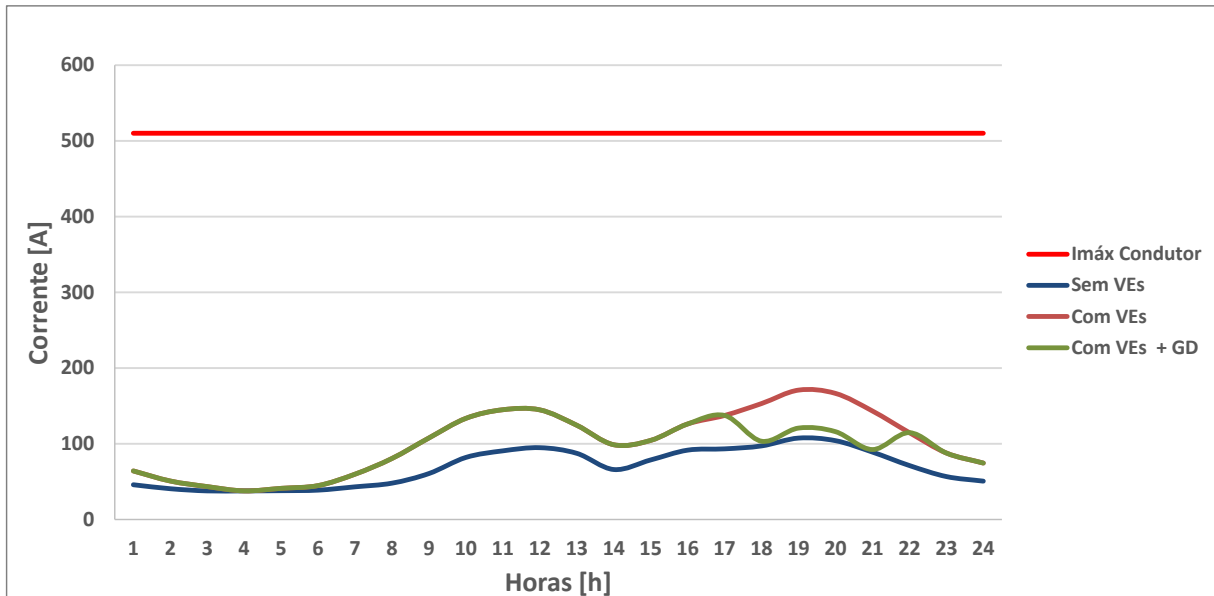
Observando a Figura 43, a corrente que flui através do condutor varia de acordo com as cargas instaladas no sistema e a influência das gerações distribuídas. Nota-se que o maior valor de corrente identificado para o primeiro cenário é de 164,8 A, às 19h. Considerando a operação do segundo cenário, a potência ativa demandada aumenta e, conseqüentemente, a corrente que circula através deste condutor aumenta, atingindo o valor de 309,42 A às 20h, o que corresponde a 61% da capacidade do condutor.

Com a inserção das GDs, a demanda de energia do alimentador do sistema é menor e a corrente durante o horário de ponta é reduzida em 12% em comparação ao segundo cenário. Portanto, a conexão das GDs no sistema contribui para alívio de carga dos condutores presentes na rede de distribuição.

Na Figura 44, a análise realizada para o carregamento da fase B possui um perfil semelhante ao da fase A, porém com valores reduzidos devido ao menor número de cargas conectadas nesta fase.

O maior valor de corrente encontrado para o primeiro cenário é de 107,73 A, às 19h. Com a inserção de veículos elétricos, a corrente que circula por este condutor aumenta para 170,87 A, 59% maior quando comparado ao cenário anterior. Com as GDs operando durante o horário de ponta, o carregamento neste horário é reduzido em 15% em comparação ao segundo cenário.

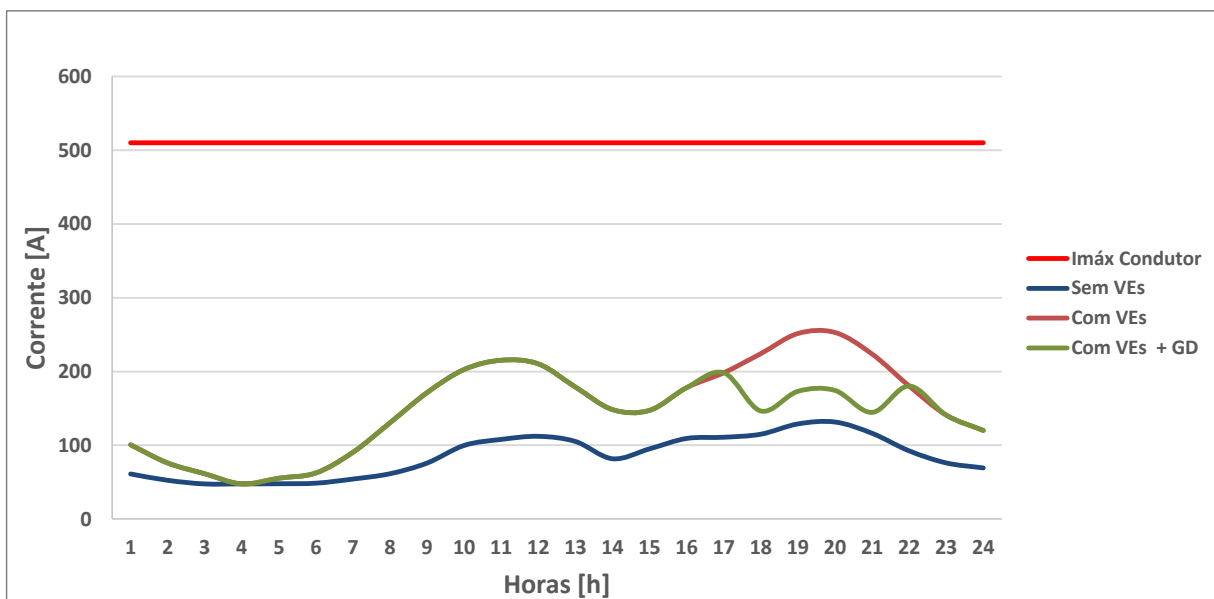
Figura 44 – Corrente da Fase B da Linha 115 em Dia Útil



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Na Figura 45 é possível verificar a variação da corrente ao longo do dia para a fase C, onde a mesma atinge seu valor máximo de 131,50 A às 20 horas, considerando a operação do primeiro cenário. Devido ao maior número de cargas conectadas nesta fase, o valor de corrente aumenta em 22% quando comparado à fase B.

Figura 45 – Corrente da Fase C da Linha 115 em Dia Útil



Fonte: Elaborado pelo Autor.

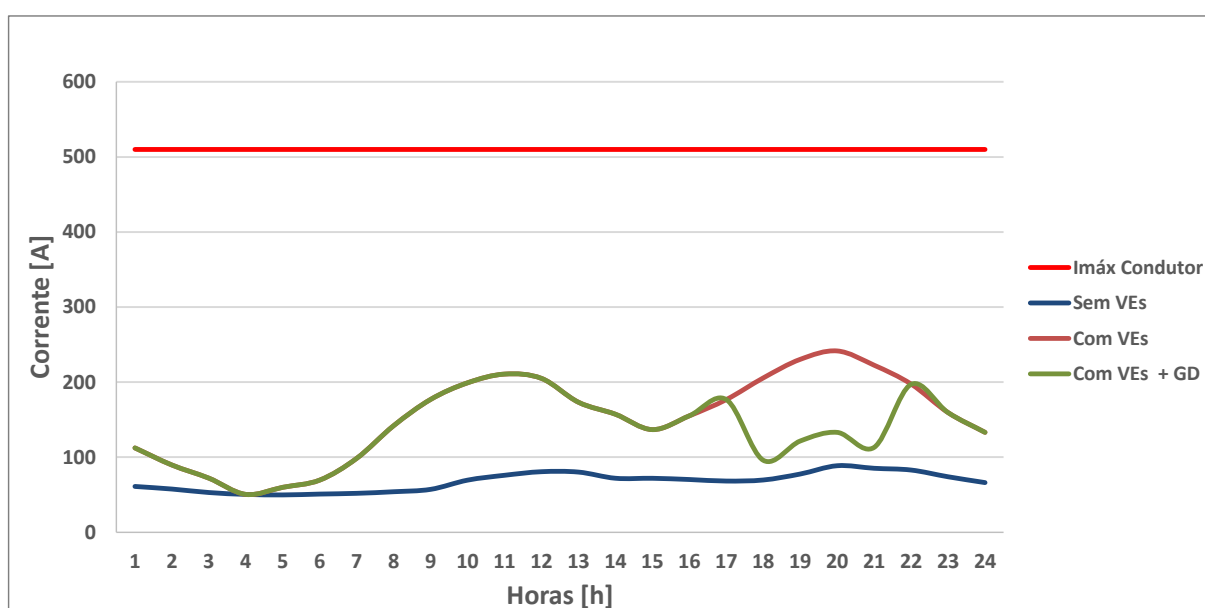
Ainda na Figura 45, é possível notar que o sistema possui o mesmo comportamento das fases A e B, para o segundo e terceiro cenário. Quando há inserção de veículos elétricos, o nível de carregamento do condutor aumenta e atinge o valor máximo às 20 horas, com 252,86 A. Com a contribuição das GDs, a energia demandada do alimentador é menor e a corrente durante o horário de ponta reduz em 15%.

Através da análise de carregamento para dias úteis foi possível verificar que em nenhum momento do dia o condutor opera próximo da capacidade limite e por este motivo não há necessidade de intervenções na rede.

A análise de carregamento também foi realizada para os fins de semana e os resultados são exibidos nas Figuras 46, 47 e 48, considerando a operação dos três cenários propostos na metodologia.

Analisando o nível de carregamento da Figura 46, é possível observar que o comportamento é similar ao de dias úteis, porém com valores menores de corrente circulando através do condutor em análise. Para a fase A, a operação do primeiro cenário tem como corrente máxima 88,64 A às 20h, sendo 46% menor quando comparado ao nível de corrente em dias úteis. Quando inseridos os veículos elétricos, observa-se um aumento na corrente, atingindo o valor de 241,55 A, o que representa 47% da capacidade do condutor.

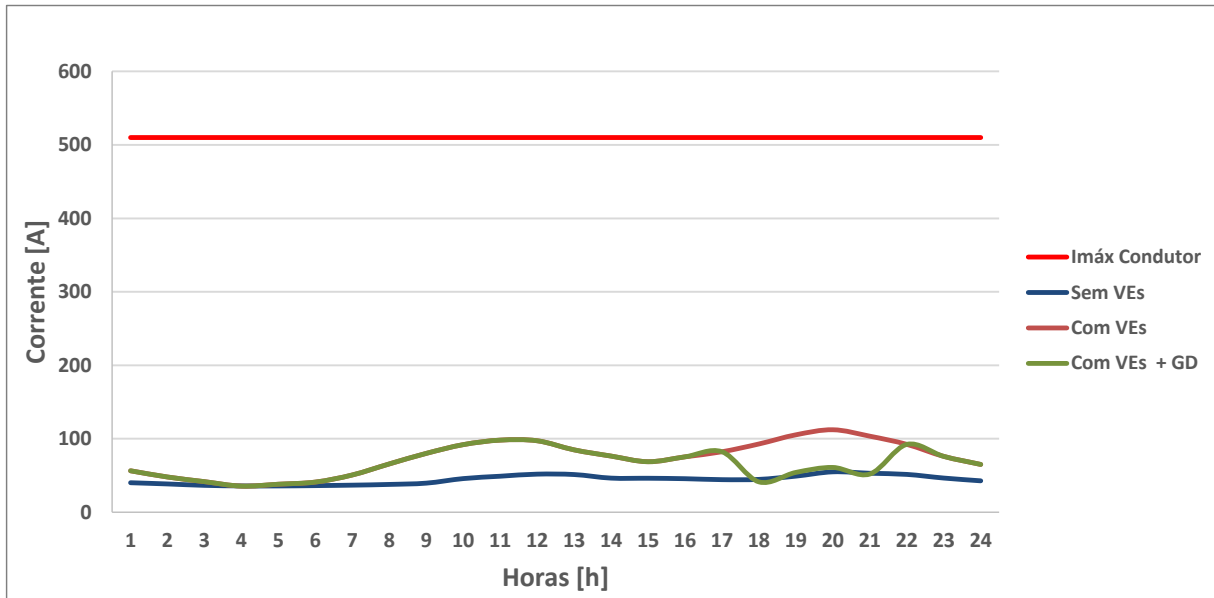
Figura 46 – Corrente da Fase A da Linha 115 em Fim de Semana



Fonte: Elaborado pelo Autor.

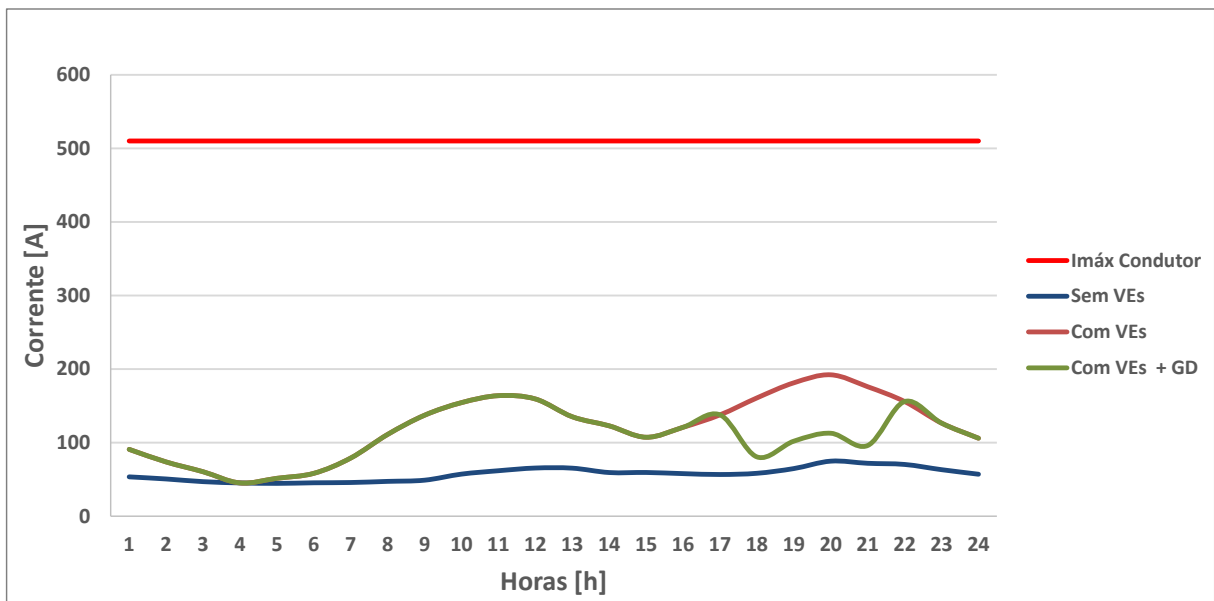
Ainda na Figura 46, a corrente que circula no condutor cai para 133,05 A com a inserção das GDs no horário de ponta, reduzindo em 45% em relação ao cenário anterior, para o mesmo horário.

Figura 47 – Corrente da Fase B da Linha 115 em Fim de Semana



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 48 – Corrente da Fase C da Linha 115 em Fim de Semana



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Para as fases B e C, representadas nas Figuras 47 e 48, observa-se que o nível de carregamento não chega próximo ao limite do condutor para nenhum dos três



cenários propostos e o comportamento ao longo do dia é semelhante ao perfil de dias úteis. Devido à menor carga demandada nos fins de semana, os valores de corrente apresentados são menores.

#### 4.3.3 Fator de Potência

Além da análise de nível de tensão e carregamento, realizou-se a avaliação do fator de potência do sistema, considerando a operação dos três cenários em dias úteis e fins de semana.

De acordo com o módulo 8 do PRODIST, “o fator de potência no ponto de conexão deve estar compreendido entre 0,92 (noventa e dois centésimos) e 1,00 (um) indutivo ou 1,00 (um) e 0,92 (noventa e dois centésimos) capacitivo, de acordo com regulamentação vigente”. (ANEEL, 2018).

Como complemento, a resolução normativa Nº 414 da ANEEL traz a informação das cobranças a serem efetuadas em caso de não atendimento do limite de fator de potência:

“Parágrafo único. Aos montantes de energia elétrica e demanda de potência reativos que excederem o limite permitido, aplicam-se as cobranças estabelecidas nos arts. 96 e 97, a serem adicionadas ao faturamento regular de unidades consumidoras do grupo A, incluídas aquelas que optarem por faturamento com aplicação da tarifa do grupo B nos termos do art. 100. (ANEEL, 2010, p. 90).”

Para este estudo, avaliou-se o fator de potência na barra 150, onde é o barramento infinito responsável por alimentar todo o sistema. A avaliação foi realizada em quatro horários distintos, sendo divididos por patamares de carga: madrugada, manhã, tarde e noite.

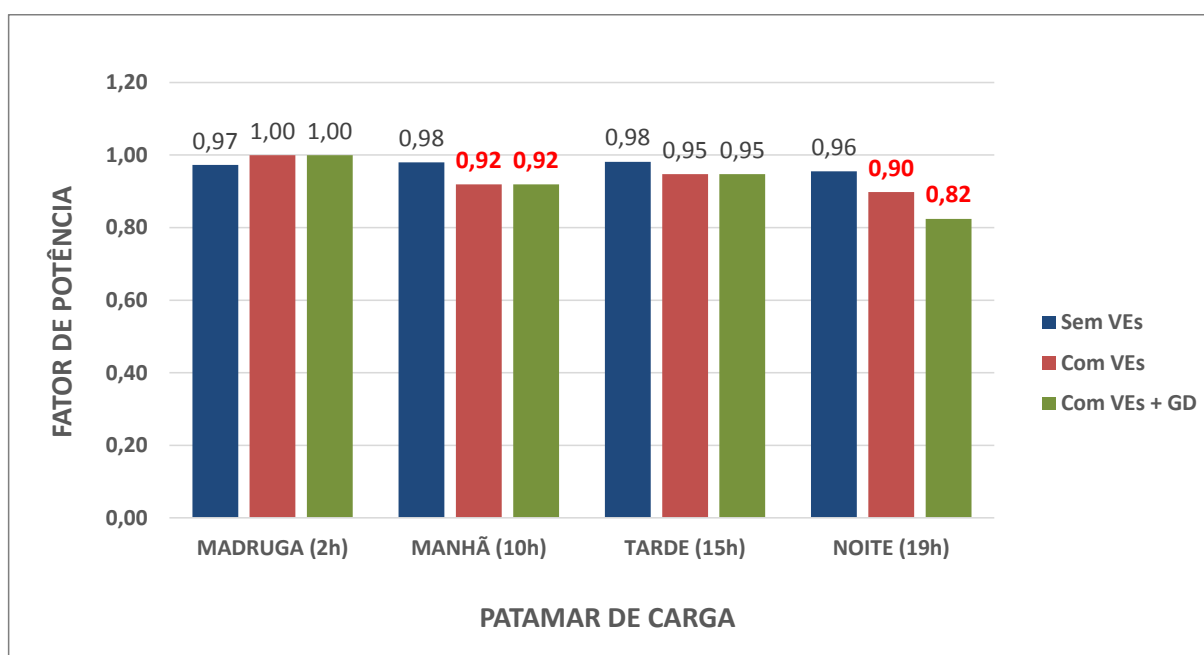
Durante a madrugada, a carga é considerada muito leve e durante a manhã é considerada média. À tarde, o consumo reduz em relação ao período da manhã e a carga é considerada leve. No patamar noite, o consumo é elevado, principalmente no horário de ponta e este corresponde à carga pesada conforme os perfis de consumo adotados neste estudo.

Na Figura 49 é possível observar os valores de fator de potência medidos para os diferentes períodos do dia, considerando a operação dos três cenários em dias úteis.

Para o primeiro cenário, o fator de potência se manteve dentro dos limites estabelecidos durante todas as medições do dia. Com a projeção dos veículos elétricos no segundo cenário, observa-se que o fator de potência reduz nos períodos de manhã, tarde e noite, sendo que durante o período da manhã o valor encontrado está no limite estabelecido e durante o horário da noite, o valor medido fica abaixo do limite estabelecido pela ANEEL. Isto ocorre devido ao aumento no consumo de energia ativa da rede, conforme curva apresentada na Figura 20.

Para o terceiro cenário, o valor dos patamares madrugada, manhã e tarde se mantiveram os mesmos encontrados no cenário anterior, visto que este cenário tem influência apenas no horário de ponta (período da noite). Durante o patamar noite, com as gerações distribuídas atuando sobre a rede de distribuição, a energia ativa demandada do alimentador do sistema diminui e com isso observa-se a redução no fator de potência, atingindo o valor de 0,82, abaixo do limite estabelecido pela ANEEL.

Figura 49 – Fator de Potência em Dia Útil



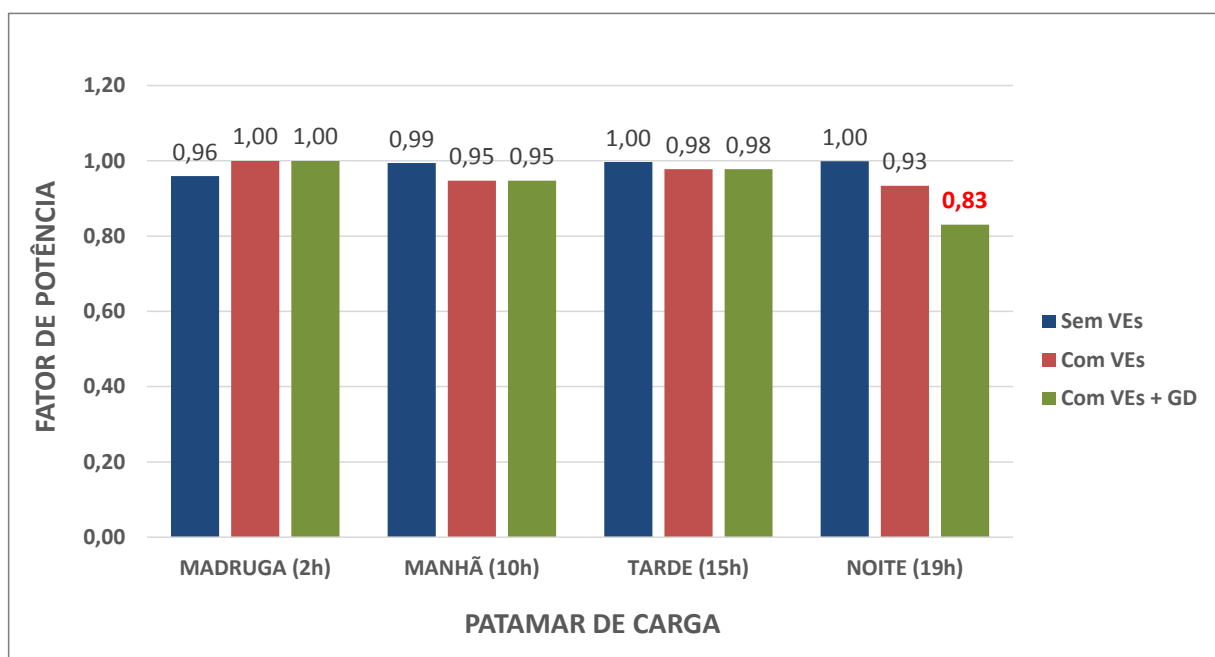
Fonte: Elaborado pelo Autor.

A análise do fator de potência também foi realizada para os fins de semana e os resultados da simulação para os três cenários pode ser visto na Figura 50. Da mesma forma que para dias úteis, a operação do primeiro cenário não ultrapassa em nenhum momento os limites estabelecidos pela ANEEL.

Com os veículos elétricos conectados à rede elétrica, observa-se que também não há valores menores que o limite de 0,92. Isto ocorre devido à redução na demanda de energia aos fins de semana, pelas demais cargas presentes no sistema.

Analisando o terceiro cenário, à medida que são inseridas as GDs, observa-se que a energia ativa demandada pelo alimentador do sistema diminui e, conseqüentemente, o fator de potência reduz. Neste cenário o valor medido do fator de potência é de 0,83, abaixo do limite estabelecido pela ANEEL.

Figura 50 – Fator de Potência em Fim de Semana



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Portanto, de acordo com os dados exibidos nas Figuras 49 e 50, nota-se que são necessárias melhorias na rede de distribuição, a fim de melhorar a eficiência do uso da energia do sistema.

#### 4.3.4 Perdas Técnicas

Segundo a ANEEL (2018), “as perdas referem-se à energia elétrica gerada que passa pelas linhas de transmissão (Rede Básica) e redes da distribuição, mas que não chega a ser comercializada, seja por motivos técnicos ou comerciais”.

Como complemento, a ANEEL (2018) comenta que as perdas técnicas são resultantes da transformação de energia elétrica em energia térmica nos condutores pelo efeito Joule e também estão relacionadas com o estado de conservação dos equipamentos presentes na rede elétrica.

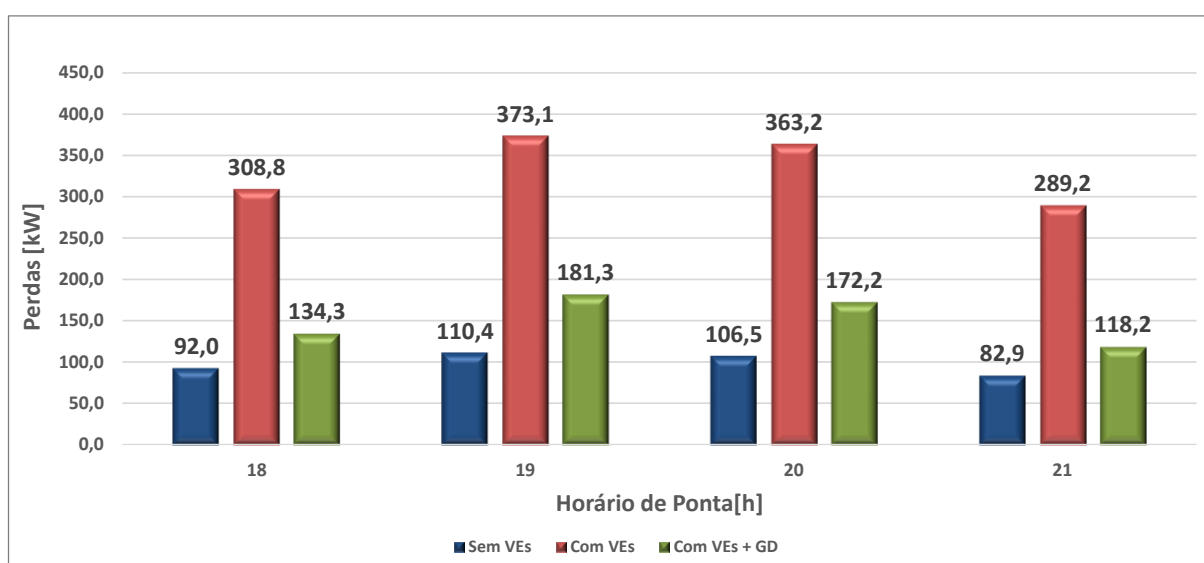
Neste estudo, as perdas técnicas de potência do sistema foram avaliadas para o horário de ponta, onde há a maior demanda de energia da rede de distribuição. Os dados foram coletados considerando a operação dos três cenários em dias úteis e fins de semana e os resultados são apresentados nas Figuras 51, 52, 53 e 54.

Na Figura 51 é possível observar a variação das perdas de potência, em kW, em cada um dos cenários durante o intervalo das 18h às 21h, para dias úteis.

Considerando a operação do primeiro cenário, a perda média encontrada é de 97,95 kW durante o horário de ponta, tendo o valor máximo encontrado às 19 horas com 110,4 kW. Com o aumento da carga, resultante da inserção de veículos elétricos no sistema, nota-se um aumento de perdas técnicas ao longo da rede em torno de 3,4 vezes com relação ao cenário anterior.

À medida que as gerações distribuídas são conectadas à rede elétrica, a potência demandada do alimentador diminui e, conseqüentemente, observa-se redução das perdas técnicas do sistema. Os valores encontrados variam entre 134,3 kW e 181,3 kW no horário de ponta para o terceiro cenário em operação.

Figura 51 – Perdas Técnicas em Dia Útil no Horário de Ponta



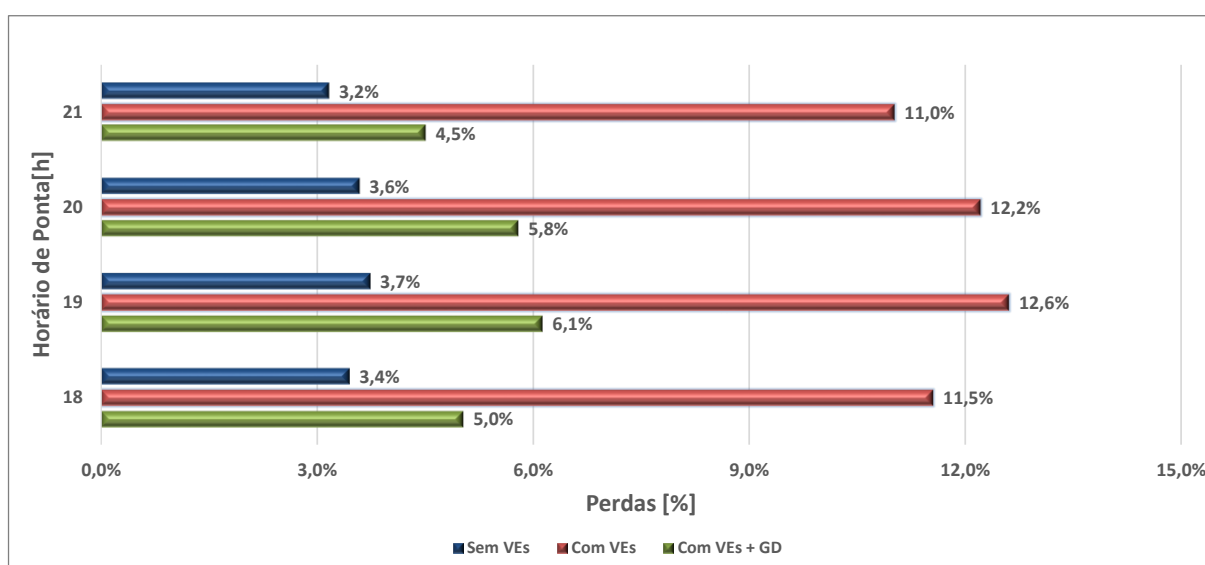
Fonte: Elaborado pelo Autor.

A Figura 52 apresenta as perdas técnicas para os três cenários, em percentuais. Sem a presença de veículos elétricos e geração distribuída, o sistema “puro” possui em torno de 3,5% de perdas técnicas em dias úteis.

Com a inserção dos veículos elétricos, através da simulação do segundo cenário, observou-se que as perdas no sistema representam 11,8%, um aumento de 3,4 vezes com relação ao cenário anterior.

Ao inserir as GDs no horário de ponta, nota-se que há uma redução nas perdas técnicas ao longo da rede de distribuição, se aproximando do primeiro cenário de simulação, com valor médio de 5,35% do total da potência demandada pelo sistema.

Figura 52 – Percentual de Perdas Técnicas em Dia Útil no Horário de Ponta



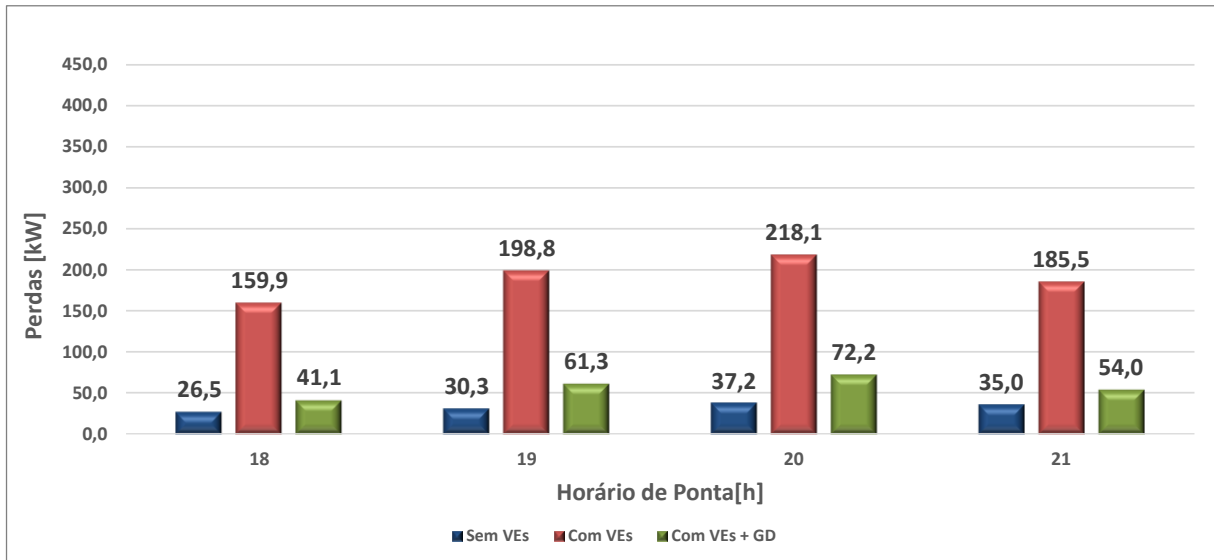
Fonte: Elaborado pelo Autor.

A análise das perdas técnicas também foi realizada para o fim de semana, considerando a operação dos três cenários durante o horário de ponta. Observa-se, através da Figura 53, que os resultados de perdas encontrados são menores comparados aos dias úteis, devido à redução de carga no sistema, de acordo com os perfis de consumo adotados neste estudo, durante o fim de semana.

Considerando a operação do primeiro cenário, há em média 32,25 kW de perdas técnicas com relação à potência total demandada pela rede elétrica. Com a penetração de veículos elétricos, as perdas no sistema aumentam consideravelmente com relação ao primeiro cenário e atingem o valor máximo de 218,10 kW às 20 horas.

Com o terceiro cenário em operação, as perdas técnicas reduzem ao longo da rede e o valor máximo encontrado é de 72,2 kW às 20 horas.

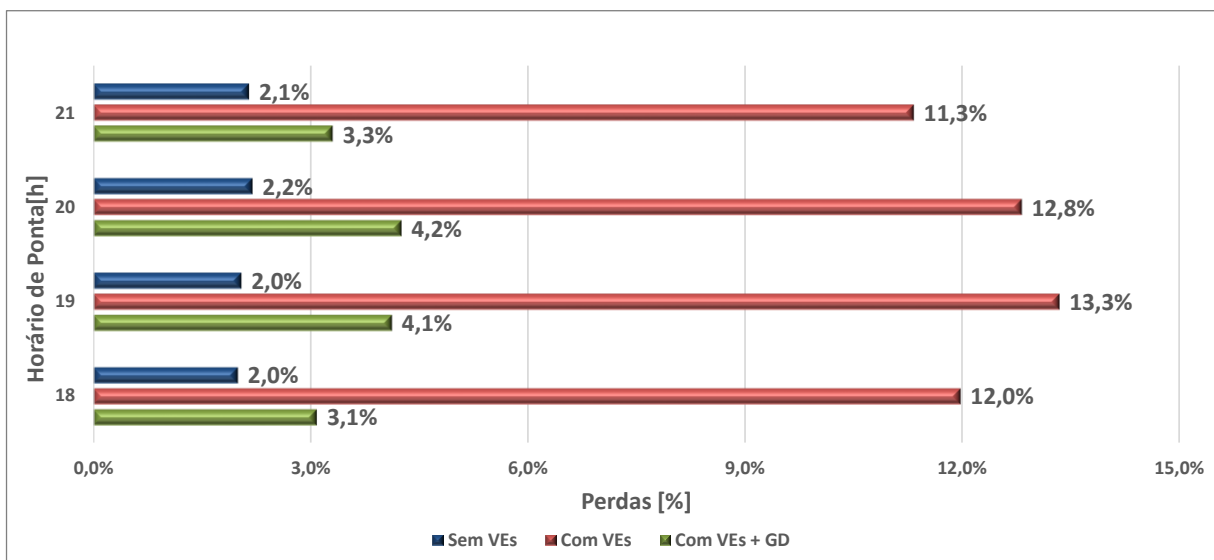
Figura 53 – Perdas Técnicas em Fim de Semana no Horário de Ponta



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Na Figura 54 são apresentados os valores de perdas técnicas em percentuais, considerando a operação dos três cenários em fins de semana.

Figura 54 – Percentual de Perdas Técnicas em Fim de Semana no Horário de Ponta



Fonte: Elaborado pelo Autor.

A rede em estudo operando sem veículos elétricos e sem GDs possui em torno de 2% de perdas técnicas, com relação à potência total demandada no horário de ponta. Considerando a operação dos VEs como cargas no sistema, nota-se o aumento nas perdas de potência, chegando a 13,3% às 19 horas. A operacionalização dos VEs

como GDs contribuem para a redução das perdas na rede, totalizando em torno de 3,7% da potência total demandada durante os fins de semana.

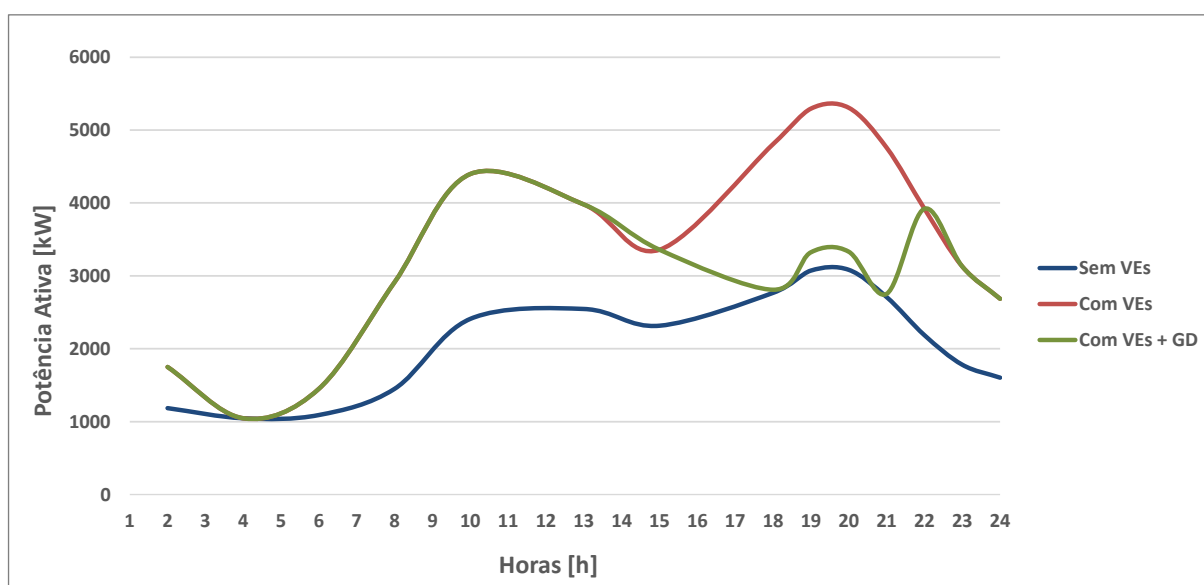
Portanto, como pode ser visto neste capítulo, a atuação dos VEs como cargas aumenta as perdas ao longo da rede distribuição, tanto em dias úteis quanto em fins de semana. Em contrapartida, a operação destes como gerações distribuídas reduzem as perdas técnicas, visto que a potência ativa demandada do alimentador da rede em estudo será menor.

#### 4.3.5 Potência

Além da análise do nível de tensão, carregamento, fator de potência e perdas técnicas, foi realizada a avaliação da potência ativa demandada e do carregamento do transformador do sistema ao longo das 24 horas do dia, para dias úteis e fins de semana.

Na Figura 55 é possível observar o comportamento da potência ativa demandada ao longo de um dia útil.

Figura 55 – Potência Ativa Demandada em Dia Útil



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Analisando a Figura 55, a demanda de potência ativa é baixa para o cenário sem veículos elétricos, onde os valores não ultrapassam 2 MW durante o período da madrugada e manhã, até às 8 horas. Após este horário, observa-se o aumento na demanda e às 12 horas atinge o valor de 2,5 MW de potência ativa.

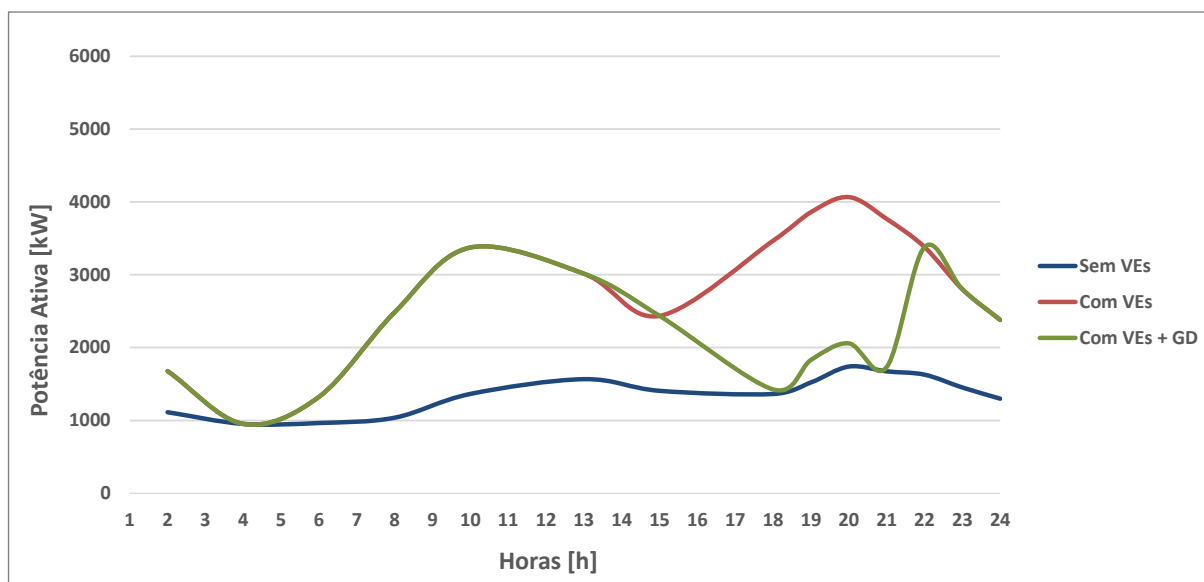
Este valor é mantido com pouca variação até às 18 horas. A partir deste horário, inicia-se o horário de ponta, onde há o aumento na demanda de energia da rede. Com isso, a potência demandada atinge o valor máximo de 3,1 MW, às 20h. Após as 21 horas, o consumo é novamente reduzido e a potência ativa demandada retorna para valores abaixo de 2 MW, no período da noite.

Com a penetração de veículos elétricos atuando como carga na rede elétrica, a demanda de energia é maior. Pode-se observar que os valores de potência ativa demandada crescem ao longo do dia, atingindo 4,4 MW às 10 horas e 5,3 MW às 20 horas, horário este com maior demanda de energia do sistema.

Com a operação do terceiro cenário, que visa a inserção de veículos elétricos como fontes geradoras no sistema durante o horário de ponta, observa-se que há uma redução de aproximadamente 40% da potência ativa demandada, mantendo os valores próximos a 3 MW no período das 18h às 21h.

Similar ao comportamento de dias úteis, a Figura 56 mostra a potência ativa demandada nos fins de semana.

Figura 56 – Potência Ativa Demandada em Fim de Semana



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Analisando a Figura 56, a potência ativa demandada oscila pouco durante o dia e atinge o valor máximo de 1,7 MW, às 20 horas. Com a operação do segundo cenário, os valores aumentam e é possível observar a crescente demanda durante o período da manhã, onde atinge o valor de 3,4 MW, às 10 horas.



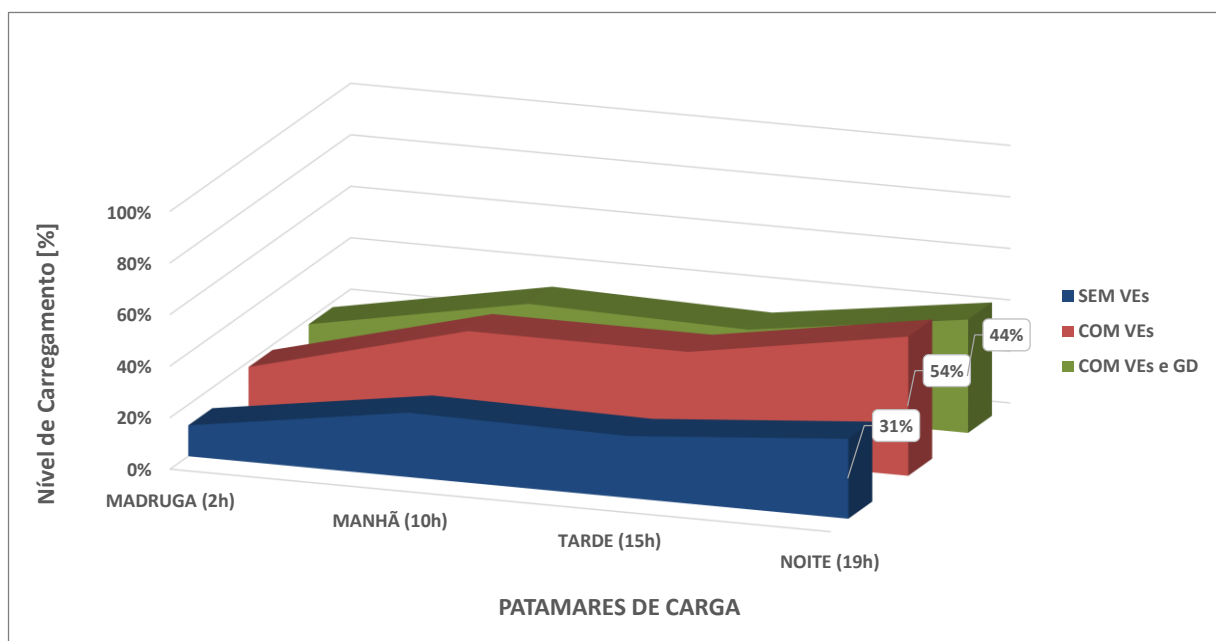
Após este horário, a potência ativa demandada é novamente reduzida e atinge o valor mínimo às 15h, com 2,4 MW. A demanda de potência ativa volta a subir e atinge o pico às 20 horas, com consumo de 4 MW. Depois das 20h, nota-se a redução na demanda e às 23 horas o valor já é menor de 3 MW.

Ao simular o terceiro cenário, a potência ativa demandada do sistema diminui e os valores encontrados no horário de ponta são similares ao do primeiro cenário. Este comportamento é observado devido à contribuição das fontes geradoras ao longo da rede elétrica, no período das 18h às 21h.

Neste estudo, também foi avaliado o carregamento do transformador para dias úteis e fins de semana, de acordo com os patamares de carga definidos como madrugada, manhã, tarde e noite. Para esta avaliação, foram coletados os dados da barra 150, onde está localizado o alimentador do sistema.

Na Figura 57 é possível observar o comportamento do transformador ao longo de um dia útil. Para o primeiro cenário, o carregamento é crescente ao longo do dia, onde possui 12% durante o patamar madrugada e atinge o valor máximo no patamar noite, com 31%. Neste cenário, observa-se que o carregamento do transformador está abaixo do valor nominal.

Figura 57 – Carregamento do Transformador em Dia Útil

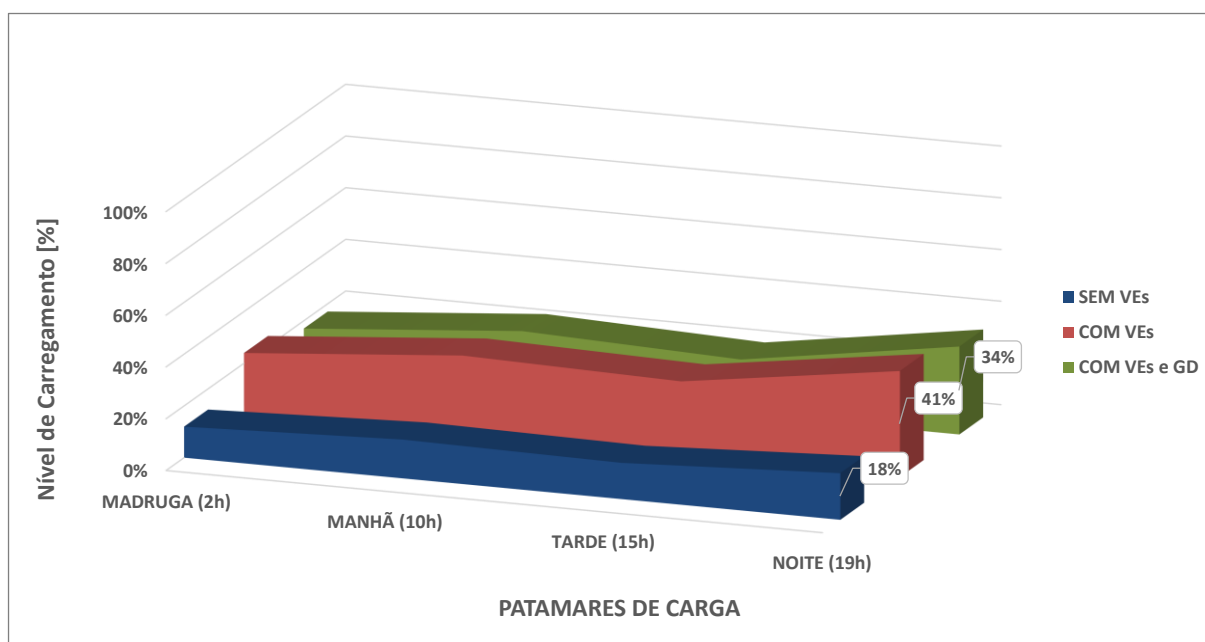


Fonte: Elaborado pelo Autor.

Ainda na Figura 57, com a inserção de veículos elétricos como carga, nota-se o aumento no carregamento do transformador, atingindo o valor máximo de 54% no patamar noite. Ao simular a operação do terceiro cenário, as fontes geradoras contribuem para com o sistema e observa-se a redução no carregamento do transformador para 44%.

Aos fins de semana, o comportamento do transformador ao longo do dia é similar aos dias úteis, porém com valores menores, devido a menor carga encontrada no sistema. Os dados coletados podem ser vistos na Figura 58.

Figura 58 – Carregamento do Transformador em Fim de Semana



Fonte: Elaborado pelo Autor.

No primeiro cenário o carregamento atingiu o valor máximo de 18% no patamar noite. Com a penetração de veículos elétricos, a carga é elevada e o carregamento do transformador atinge 41%. Com a contribuição das GDs, há um alívio de carga no transformador, onde o nível de carregamento fica em 34%.

Através da análise de carregamento, observou-se que o transformador trabalha com valores abaixo da potência nominal e o valor máximo encontrado foi no segundo cenário de dias úteis no patamar noite, com 54%. Porém, com o auxílio das gerações distribuídas, o carregamento foi reduzido e em nenhum momento o carregamento ultrapassou a marca de 50%.

## 5 CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou um estudo sobre a expansão dos veículos elétricos nas redes de distribuição de energia elétrica, considerando recursos como carga e atuação como geração distribuída no horário de pico. Foram realizadas simulações em 3 cenários, subdivididos em 6 situações, sendo os principais a avaliação da rede elétrica sem veículos elétricos, a inserção de veículos elétricos na rede como consumidores e a inserção destes veículos como geradores distribuídos.

O objetivo principal deste estudo era a avaliação da inserção dos veículos elétricos em redes de distribuição de energia elétrica, onde o mesmo foi abordado através dos cenários especificados no decorrer do trabalho. Como conclusão deste objetivo, foram realizadas as simulações no *software OpenDSS*, e constatados impactos na rede com a penetração dos VEs, considerando alguns aspectos, abordados a seguir.

Os objetivos específicos elaborados neste estudo foram concluídos no decorrer do trabalho. Já os objetivos de análise do perfil de carga de veículos elétricos e a avaliação da capacidade energética de um veículo elétrico para uma carga completa, serviram como base para a modelagem da estrutura utilizada na realização deste estudo. Com isso, foi possível identificar os impactos em diferentes cenários de acordo com a distribuição adotada de blocos de consumidores. Essa estruturação possibilitou também a avaliação do comportamento da rede de distribuição, com a inserção de veículos elétricos atuando como geração distribuída.

No decorrer deste estudo foram avaliados os cenários simulados com perspectivas diferentes, para possibilitar a avaliação do nível de tensão, carregamento, fator de potência, perdas e potência ativa demandada do alimentador. Através da análise do nível de tensão, foi observado que, com o aumento da carga na rede, houve um aumento no número de transgressões críticas e precárias no sistema. Já com a inserção da geração distribuída foi possível observar melhorias nos níveis de tensão durante o horário de ponta.

Quanto ao carregamento dos condutores da rede, considerando a inserção de 11% de VEs, parâmetro utilizado para este estudo, não houve impacto. Caso o parâmetro de inserção seja superior, deve-se avaliar novamente os impactos a fim de evitar intervenções na rede.

A respeito do fator de potência, com a inserção dos VEs, foi possível observar que houve um impacto mínimo na rede de distribuição estudada. Já a atuação destes veículos como geração distribuída, resultou em impactos na eficiência do uso da energia na rede, devido ao fluxo de energia reativa não ser compensado. Uma das possíveis formas de corrigir este impacto é a instalação de bancos automáticos de capacitores próximos aos pontos identificados com baixo fator de potência.

Ao longo do estudo, foi constatado o aumento de perdas técnicas com a penetração de veículos elétricos. Este impacto foi minimizado com a atuação das gerações distribuídas, onde houve redução de mais de 50% das perdas técnicas durante o horário de ponta.

Em relação à potência ativa demandada do alimentador, foi observado impacto mínimo, tanto com veículos elétricos atuando como carga, quanto atuando como geração distribuída. Em ambos os cenários, o carregamento ficou abaixo da potência nominal do transformador.

À medida que os veículos elétricos forem se tornando mais presentes, haverá impacto nos níveis de qualidade de energia, onde serão necessárias melhorias na rede. Diante disso, é necessário um estudo sobre a melhor forma e horário de carregamento destes veículos, assim como a atuação destes como geração distribuída através das redes inteligentes.

## 5.1 Sugestões para Trabalhos Futuros

Com base no assunto escolhido para estudo, sugerem-se como trabalhos futuros:

- Coletar dados reais sobre o comportamento e os impactos dos veículos elétricos na rede de distribuição de energia;
- Avaliar quais investimentos são necessários para manter o bom funcionamento das redes de distribuição;
- Analisar outros parâmetros, como distorção harmônica no sistema elétrico;
- Avaliar a operação dos veículos elétricos conectados na rede elétrica, através da aplicação do conceito *vehicle to grid (V2G)*.
- Avaliar o carregamento parcial de um veículo elétrico percorrendo diferentes pontos da rede, como uma carga móvel.

## REFERÊNCIAS

- ABB. **O futuro da recarga rápida para veículos elétricos**. Disponível em: <<http://www.abb.com.br/cawp/seitp202/6d799c355d40a906832579db0042b4f4.aspx>>. Acesso em: mai. 2018.
- ALVES, José Eustáquio Diniz. Transição dos carros de combustão interna para os veículos elétricos: uma mudança de época. **Site Eco Debate**. Disponível em: <<https://www.ecodebate.com.br/2017/07/26/transicao-dos-carros-de-combustao-interna-para-os-veiculos-eletricos-uma-mudanca-de-epoca-artigo-de-jose-eustaquio-diniz-alves/>>. Acesso em: mar. 2018.
- ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica. **Geração distribuída ultrapassa 20 mil conexões**. Disponível em: <[http://www.aneel.gov.br/sala-de-imprensa-exibicao/-/asset\\_publisher/XGPXSqdMFHrE/content/geracao-distribuida-ultrapassa-20-mil-conexoes/656877](http://www.aneel.gov.br/sala-de-imprensa-exibicao/-/asset_publisher/XGPXSqdMFHrE/content/geracao-distribuida-ultrapassa-20-mil-conexoes/656877)>. Acesso em: mai. 2018.
- ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica. **Perdas de Energia**. Disponível em: <[http://www.aneel.gov.br/metodologia-distribuicao/-/asset\\_publisher/e2INtBH4EC4e/content/perdas/654800](http://www.aneel.gov.br/metodologia-distribuicao/-/asset_publisher/e2INtBH4EC4e/content/perdas/654800)>. Acesso em: ago. 2018.
- ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica. **Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional – PRODIST (Módulo 08 – Qualidade da energia elétrica)**, rev. 10, Brasília, 2018.
- ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica. **Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional – PRODIST (Módulo 02 – Planejamento da Expansão do Sistema de Distribuição)**, rev. 7, Brasília, 2016.
- ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica. **Qualidade do Produto**. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/qualidade-do-produto>>. Acesso em: mai. 2018.
- ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica. **Qualidade do Serviço**. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/qualidade-do-servico2>>. Acesso em: mai. 2018.
- ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica. **RESOLUÇÃO NORMATIVA Nº 414**. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/ren-414>>. Acesso em: ago. 2018.
- ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica. **Tarifa Branca**. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/tarifa-branca>>. Acesso em: jun. 2018.
- ARIOLI, Vitor Torquato. **Análise de impactos técnicos provocados pela penetração massiva de veículos elétricos em redes de distribuição de energia elétrica**. Campinas: Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP, 2016, 174p. Dissertação (Mestrado).
- BAQUERO, John Fredy Franco. **Estratégia de decomposição aplicada ao problema de planejamento da expansão de sistemas de distribuição**. Ilha Solteira: Faculdade de Engenharia do Campus de Ilha Solteira - UNESP, 2012. 169p. Tese (Doutorado).

BARAN, R.; LEGEY, L. F. L. **Veículos elétricos: história e perspectivas no Brasil**. Rio de Janeiro: BNDES, 2010.

BASSO, Cleofe. **O impacto dos veículos elétricos plug-in no sistema elétrico de potência**. 2011, 66p. Trabalho de conclusão de curso – Universidade Federal do Pampa, Alegrete, 2011.

BENES, Marcelo Moraes. **Frenagem regenerativa do motor de indução do veículo Maglev-cobra**. 2014, 62p. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, Rio de Janeiro, 2014.

BMW. **BMW i3**. Disponível em: <<https://www.bmw.com.br/pt/all-models/bmw-i/3/2017/vis%C3%A3o-geral.html>>. Acesso em: mar. 2018.

BNEF, *Bloomberg New Energy Finance*. **Electric Vehicles**. Disponível em: <<https://bnef.turtl.co/story/evo2018>>. Acesso em: mai. 2018.

BNEF, *Bloomberg New Energy Finance*. **Ônibus elétricos vão crescer mais rápido do que os veículos elétricos à medida que os veículos convencionais desaparecem**. Disponível em: <<https://www.bloomberg.com.br/blog/onibus-eletricos-vao-crescer-mais-rapido-que-os-veiculos-eletricos-medida-que-os-veiculos-convencionais-desaparecem/>>. Acesso em: mai. 2018.

CALÇADO, Thamara Emanuelle de Oliveira. **Estudo preliminar de implantação de estações de recarga de veículos elétricos no centro de tecnologia da UFRJ**. 2015, 84p. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ. 2015.

CARRO elétrico: história, prós e contras, curiosidades e mais! **Blog Inman Motor Sales**. Disponível em: <<https://blog.inmanshow.com/2018/02/05/carro-eletrico-historia-pros-e-contras-curiosidades-e-mais/>>. Acesso em: mar. 2018.

COMPONENTES de um carro elétrico. **Site O Carro Elétrico**. Disponível em: <<http://ocarroeletrico.com/geral/componentes-de-um-carro-eletrico/>>. Acesso em: abr. 2018.

CONSUMIDOR pode adotar a Tarifa Branca. **Revista Potência**. Disponível em: <<http://www.revistapotencia.com.br/index.php/noticias/ultimas-noticias/item/2269-consumidor-pode-adotar-a-tarifa-branca.html>>. Acesso em: jun. 2018.

COPEL, Companhia Paranaense de Energia. **Tarifa Branca**. Disponível em: <<http://www.copel.com/hpcopel/root/nivel2.jsp?endereco=%2Fhpcopel%2Frural%2Fpagcopel2.nsf%2Fdocs%2FB0CA4C8DF4B62F98832581F00058CCF9>>. Acesso em: jun. 2018.

COSTA, Marcos. A demanda de energia do carro elétrico. **Jornal GGN**. Disponível em: <<https://jornalgggn.com.br/blog/luisnassif/a-demanda-de-energia-do-carro-eletrico>>. Acesso em: abr. 2018.

DECKMANN, S.M.; POMILIO, J.A. **IT – 012 – Avaliação da Qualidade de Energia**. Campinas: Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas, fev. 2017.

DELGADO, F.; et al. Carros Elétricos. **Cadernos FGV Energia**, ano 4, n. 7. Rio de Janeiro, mai. 2017.

DELGADO, F.; FEBRARO, J.; SILVA, T.B. da. Carros Elétricos. **Cadernos FGV Energia**. Rio de Janeiro, mai. 2017, 20p.

DIAS, Diego. Elétricos serão mais baratos que convencionais em 2022, diz análise. **Revista Quatro Rodas**. Disponível em: <<https://quatrorodas.abril.com.br/noticias/eletricos-serao-mais-baratos-que-convencionais-em-2022-diz-analise/>>. Acesso em: mai. 2018.

Em 2020, frota brasileira terá 40 mil carros elétricos, projeta Anfavea. **Jornal Correio do Povo**. Disponível em: <<http://www.correiodopovo.com.br/Noticias/Geral/Transito/2017/7/623638/Em-2020,-frota-brasileira-tera-40-mil-carros-eletricos,-projeta-Anfavea>>. Acesso em: mai. 2018.

FERNANDES, Caio Kaipper. **Avaliação da inserção de carros elétricos na operação de uma rede de distribuição de energia elétrica**. 2013, 87p. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, Porto Alegre, 2013.

FERREIRA, T.T.; CASTRO, B.H.R. de. **Veículos elétricos: aspectos básicos, perspectivas e oportunidades**. Rio de Janeiro: BNDES, 2010.

FONSECA, Ricardo Lopes da. Tire dúvidas sobre os carros híbridos. **G1**. Disponível em: <<http://g1.globo.com/Noticias/Carros/0,,MUL1164619-9658,00-TIRE+DUVIDAS+SOBRE+OS+CARROS+HIBRIDOS.html>>. Acesso em: abr. 2018.

GENERAL CABLE BRASIL. **Cabo de alumínio com alma de aço (CAA)**. Disponível em: <<https://www.generalcable.com/latam/br/products-solutions/transmission-lines?lang=pt-BR>>. Acesso em: ago. 2018.

GOMES, Luís Manuel Martins. **O Veículo Elétrico e a sua Integração no Sistema Elétrico**. Lisboa: Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, 2010, 98p. Dissertação (Mestrado). Disponível em: <<http://docplayer.com.br/10089142-O-veiculo-electrico-e-a-sua-integracao-no-sistema-electrico.html>>. Acesso em: abr. 2018.

GUGGISBERG, Ricardo. Venda de carros elétricos e híbridos no Brasil cresce 65% até maio. **G1**. Disponível em: <<https://g1.globo.com/carros/noticia/venda-de-carros-eletricos-e-hibridos-no-brasil-cresce-65-ate-maio.ghtml>>. Acesso em: abr. 2018.

HALLACK, Michelle; VAZQUEZ, Miguel. Os atuais modelos de carros elétricos e potencial de inserção no Brasil. **Ambiente Energia**. Disponível em: <<https://www.ambienteenergia.com.br/index.php/2016/07/os-atuais-modelos-de-carros-eletricos-e-o-potencial-de-insercao-brasil/29421>>. Acesso em: abr. 2018.

IEA, *International Energy Agency*. **Global EV Outlook 2017 - Two million and counting**. França: IEA, jun. 2017.

IHEKWABA, Afoma; Kim, Charles. **Analysis of Electric Vehicle Charging Impact on Grid Voltage Regulation**. Department of Electrical Engineering and Computer Engineering - Howard University, 2017.

INEE, Instituto Nacional de Eficiência Energética. **O que é Geração Distribuída**. Disponível em: <[http://www.inee.org.br/forum\\_ger\\_distrib.asp](http://www.inee.org.br/forum_ger_distrib.asp)>. Acesso em: mai. 2018.

INEE, Instituto Nacional de Eficiência Energética. **VE e Geração Distribuída**. Disponível em: <[http://www.inee.org.br/veh\\_gd.asp?Cat=veh](http://www.inee.org.br/veh_gd.asp?Cat=veh)>. Acesso em: jun. 2018.

LEMOS, João Ricardo Ferreira. **Modelagem de linhas de transmissão para estudos de transitórios eletromecânicos**. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, 2008.

LENZ, André Luis. **Freio Regenerativo (Sistema de Recuperação de Energia Cinética)**. Disponível em: <<http://automoveiseletricos.blogspot.com/2013/03/freio-regenerativo-sistema-de.html>>. Acesso em: mai. 2018.

LENZ, André Luis. **Manutenção dos Veículos Elétricos (VEs)**. Disponível em: <<http://automoveiseletricos.blogspot.com/2012/07/manutencao-dos-veiculos-eletricos.html>>. Acesso em: mai. 2018.

MIGLIACCI, Paulo. Destino de bateria de carros elétricos será desafio do setor. **Jornal Folha de São Paulo**. Disponível em: <<https://www1.folha.uol.com.br/mercado/2017/09/1921222-o-que-fazer-com-a-bateria-de-carros-eletricos-sera-desafio-do-setor.shtml>>. Acesso em: abr. 2018.

Ministério de Minas e Energia – MME; Empresa de Pesquisa Energética – EPE. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2026**. PDE 2026, Brasília: MME/EPE, 2017.

MOORHOUSE, J.; LAUFENBERG, K. **Electric vehicles powering the future**. The Pembina Institute Backgrounder, set. 2010. 22p.

NATIONAL Grid study explores market potential for grid-balancing services for plug-in vehicles. **Green Car Congress**. Disponível em: <<https://www.greencarcongress.com/2011/05/balancing-20110510.html>>. Acesso em: ago. 2018.

NICOLAS, Romain. **The different driving cycles**. Disponível em: <<http://www.car-engineer.com/the-different-driving-cycles/>>. Acesso em: abr. 2018.

NISSAN. **Novo Nissan Leaf**. Disponível em: <<https://www.nissan.pt/veiculos/novos-veiculos/leaf.html>>. Acesso em: ago. 2018.

ONS, Operador Nacional do Sistema Elétrico. **Consolidação da previsão de carga para a elaboração do Programa Mensal da Operação Energética**, Submódulo 5.6, rev. 2016.12, 2017.



PAREDES, M.G.S.P.; POMILIO, J.A.; MASTELARI, N. Modelagem de frenagem regenerativa em veículo elétrico. **Revista Ciência e Tecnologia**. Campinas, v.15, n.27, p.15-21, jul./dez. 2012.

PELEGI, Alexandre. Estatal prevê crescimento de veículos elétricos no Brasil. **Diário do Transporte**. Disponível em: <<https://diariodotransporte.com.br/2017/05/25/estatal-preve-crescimento-de-veiculos-eletricos-no-brasil/>>. Acesso em: abr. 2018.

PFITSCHER, Luciano Lopes. **Reconfiguração automática das redes de distribuição de energia elétrica com monitoramento em tempo real**. Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, 2013. 146p. Tese (Doutorado).

PLUMER, Brad. **When Will Electric Cars Go Mainstream? It May Be Sooner Than You Think**. Disponível em: <<https://www.nytimes.com/2017/07/08/climate/electric-cars-batteries.html>>. Acesso em: mar. 2018.

QUINTANILHA, Sérgio. Carros elétricos e híbridos no Brasil: o que pensam as montadoras. **Revista Isto é Dinheiro**. Disponível em: <<https://www.istoedinheiro.com.br/carros-eletricos-e-hibridos-no-brasil-o-que-pensam-as-montadoras/>>. Acesso em: mar. 2018.

RASKIN, Amy; SHAH, Saurin. **The Emergence of Hybrid Vehicles**. Nova Iorque: *Alliance Bernstein*, jun. 2006.

ROCHA, B.P. da; ALBERTON, H.B.S.; OLIVEIRA, L.B. de. **Frenagem Regenerativa**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul -UFRGS, 2014.

RODRIGUES, Daniele. Como funciona o motor elétrico de veículos? **Revista Oficina da Net**. Disponível em: <<https://www.oficinadanet.com.br/post/18004-como-funciona-o-motor-eletrico-de-veiculos>>. Acesso em: mar. 2018.

SANTOS, Aliandro Henrique Costa. **Uma contribuição ao estudo dos freios de atrito para aplicação em frenagem regenerativa**. Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2009. 175p. Tese (Doutorado).

SILVA, João Paulo Niggli. **Avaliação de impactos dos veículos elétricos nos sistemas de distribuição das concessionárias EDP Bandeirantes e EDP ESCELSA**. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2014, 121p. Dissertação (Mestrado).

SILVA, T.B.; HOLLANDA, L.; CUNHA, P.C.F. da. Recursos Energéticos Distribuídos. **Cadernos FGV Energia**, ano 3, n. 7. Rio de Janeiro, mai. 2016.

SILVA, Tatiana Bruce da. **Recarga de veículos elétricos: o que esperar quando o combustível dos nossos carros for a eletricidade?** *Caderno Opinião*. Rio de Janeiro: FGV Energia, dez. 2017.

SIMON, Emanuel Cella. **Avaliação de impactos da recarga de veículos elétricos em sistemas de distribuição**. Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2013, 149p. Dissertação (Mestrado).

TOYOTA. **Toyota Prius**. Disponível em: <[https://www.toyota.com.br/modelos/prius/?gclid=EAlaIQobChMI0p3dzb-92QIVCQSRCh0hZQtgEAAYASAAEgle4vD\\_BwE#!](https://www.toyota.com.br/modelos/prius/?gclid=EAlaIQobChMI0p3dzb-92QIVCQSRCh0hZQtgEAAYASAAEgle4vD_BwE#!)>. Acesso em: mar. 2018.

VIACAVA, Juliana Escobar. **Proposta de metodologia para planejamento da expansão de sistemas de distribuição de média tensão considerando aplicação de recursos de automação**. Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS, São Leopoldo, 2014.

VONBUN, Christian. **Impactos ambientais e econômicos dos veículos elétricos e híbridos plug-in: uma revisão da literatura**. Brasília: IPEA, ago. 2015.

WELLE, Deutsche. Frota mundial de carros eletrificados cresce 55% em um ano. **G1**. Disponível em: <<https://g1.globo.com/carros/noticia/frota-mundial-de-carros-eletricos-cresce-55-em-um-ano.ghtml>>. Acesso em: abr. 2018.

## ANEXO A – CARGAS ORIGINAIS DO SISTEMA

As cargas originais do sistema foram distribuídas aleatoriamente de acordo com os perfis de consumo descritos na Tabela 2.

Tabela 2 – Distribuição das Cargas conforme os Perfis de Consumo Definidos

(Continua)

Nome da Carga	Fase A		Fase B		Fase C		Perfil
	P (kW)	Q (kVAr)	P (kW)	Q (kVAr)	P (kW)	Q (kVAr)	
Load.S1a	40	20	-	-	-	-	Res <= 500
Load.S2b	-	-	20	10	-	-	Res > 500
Load.S4c	-	-	-	-	40	20	Res > 500
Load.S5c	-	-	-	-	20	10	Res > 500
Load.S6c	-	-	-	-	40	20	Res > 500
Load.S7a	20	10	-	-	-	-	Res <= 500
Load.S9a	40	20	-	-	-	-	Res <= 500
Load.S10a	20	10	-	-	-	-	Res > 500
Load.S11a	40	20	-	-	-	-	Res > 500
Load.S12b	-	-	20	10	-	-	Res <= 500
Load.S16c	-	-	-	-	40	20	Res > 500
Load.S17c	-	-	-	-	20	10	Res > 500
Load.S19a	40	20	-	-	-	-	Comercial
Load.S20a	40	20	-	-	-	-	Comercial
Load.S22b	-	-	40	20	-	-	Comercial
Load.S24c	-	-	-	-	40	20	Comercial
Load.S28a	40	20	-	-	-	-	Comercial
Load.S29a	40	20	-	-	-	-	Comercial
Load.S30c	-	-	-	-	40	20	Comercial
Load.S31c	-	-	-	-	20	10	Comercial
Load.S32c	-	-	-	-	20	10	Comercial
Load.S33a	40	20	-	-	-	-	Comercial
Load.S34c	-	-	-	-	40	20	Res <= 500
Load.S35a	40	20	-	-	-	-	Comercial
Load.S37a	40	20	-	-	-	-	Comercial
Load.S38b	-	-	20	10	-	-	Comercial
Load.S39b	-	-	20	10	-	-	Comercial
Load.S41c	-	-	-	-	20	10	Comercial
Load.S42a	20	10	-	-	-	-	Comercial
Load.S43b	-	-	40	20	-	-	Comercial
Load.S45a	20	10	-	-	-	-	Comercial
Load.S46a	20	10	-	-	-	-	Comercial
Load.S47	35	25	35	25	35	25	Comercial
Load.S48	70	50	70	50	70	50	Comercial

(Continua)

Nome da Carga	Fase A		Fase B		Fase C		Perfil
	P (kW)	Q (kVAr)	P (kW)	Q (kVAr)	P (kW)	Q (kVAr)	
Load.S49a	35	25	-	-	-	-	Comercial
Load.S49b	-	-	70	50	-	-	Comercial
Load.S49c	-	-	-	-	35	20	Comercial
Load.S50c	-	-	-	-	40	20	Comercial
Load.S51a	20	10	-	-	-	-	Comercial
Load.S52a	40	20	-	-	-	-	Res <= 500
Load.S53a	40	20	-	-	-	-	Res <= 500
Load.S55a	20	10	-	-	-	-	Res <= 500
Load.S56b	-	-	20	10	-	-	Res > 500
Load.S58b	-	-	20	10	-	-	Res <= 500
Load.S59b	-	-	20	10	-	-	Res > 500
Load.S60a	20	10	-	-	-	-	Res <= 500
Load.S62c	-	-	-	-	40	20	Res <= 500
Load.S63a	40	20	-	-	-	-	Res <= 500
Load.S64b	-	-	75	35	-	-	Res <= 500
Load.S65a	35	25	-	-	-	-	Res <= 500
Load.S65b	-	-	35	25	-	-	Res <= 500
Load.S65c	-	-	-	-	70	50	Res <= 500
Load.S66c	-	-	-	-	75	35	Res > 500
Load.S68a	20	10	-	-	-	-	Industrial
Load.S69a	40	20	-	-	-	-	Industrial
Load.S70a	20	10	-	-	-	-	Industrial
Load.S71a	40	20	-	-	-	-	Industrial
Load.S73c	-	-	-	-	40	20	Industrial
Load.S74c	-	-	-	-	40	20	Industrial
Load.S75c	-	-	-	-	40	20	Industrial
Load.S76a	105	80	-	-	-	-	Industrial
Load.S76b	-	-	70	50	-	-	Industrial
Load.S76c	-	-	-	-	70	50	Industrial
Load.S77b	-	-	40	20	-	-	Industrial
Load.S79a	40	20	-	-	-	-	Industrial
Load.S80b	-	-	40	20	-	-	Industrial
Load.S82a	40	20	-	-	-	-	Industrial
Load.S83c	-	-	-	-	20	10	Industrial
Load.S84c	-	-	-	-	20	10	Industrial
Load.S85c	-	-	-	-	40	20	Industrial
Load.S86b	-	-	20	10	-	-	Industrial
Load.S87b	-	-	40	20	-	-	Industrial
Load.S88a	40	20	-	-	-	-	Industrial
Load.S90b	-	-	40	20	-	-	Industrial
Load.S92c	-	-	-	-	40	20	Industrial
Load.S94a	40	20	-	-	-	-	Industrial
Load.S95b	-	-	20	10	-	-	Industrial

(Conclusão)

Nome da Carga	Fase A		Fase B		Fase C		Perfil
	P (kW)	Q (kVAr)	P (kW)	Q (kVAr)	P (kW)	Q (kVAr)	
Load.S96b	-	-	20	10	-	-	Industrial
Load.S98a	40	20	-	-	-	-	Industrial
Load.S99b	-	-	40	20	-	-	Industrial
Load.S100c	-	-	-	-	40	20	Industrial
Load.S102c	-	-	-	-	20	10	Res <= 500
Load.S103c	-	-	-	-	40	20	Res <= 500
Load.S104c	-	-	-	-	40	20	Res <= 500
Load.S106b	-	-	40	20	-	-	Res <= 500
Load.S107b	-	-	40	20	-	-	Res <= 500
Load.S109a	40	20	-	-	-	-	Res > 500
Load.S111a	20	10	-	-	-	-	Res > 500
Load.S112a	20	10	-	-	-	-	Res > 500
Load.S113a	40	20	-	-	-	-	Res > 500
Load.S114a	20	10	-	-	-	-	Res > 500
<b>Total</b>	<b>1420</b>	<b>775</b>	<b>915</b>	<b>515</b>	<b>1155</b>	<b>630</b>	

Fonte: Adaptado do IEEE (2014).

## ANEXO B – VEÍCULOS ELÉTRICOS DO SISTEMA

Conforme proposta deste estudo, os locais com veículos elétricos podem ser visualizados na Tabela 3.

Tabela 3 – Identificação dos Veículos Elétricos no Sistema

(Continua)				(Conclusão)			
Nome da Carga	Potência Ativa (kW)			Nome da Carga	Potência Ativa (kW)		
	Fase A	Fase B	Fase C		Fase A	Fase B	Fase C
Load.VE4c	-	-	60	Load.VE65a	20	-	-
Load.VE5c	-	-	60	Load.VE65b	-	20	-
Load.VE6c	-	-	60	Load.VE65c	-	-	20
Load.VE10a	20	-	-	Load.VE66c	-	-	60
Load.VE12b	-	6,67	-	Load.VE71a	66,67	-	-
Load.VE16c	-	-	40	Load.VE73c	-	-	6,67
Load.VE17c	-	-	40	Load.VE75c	-	-	66,67
Load.VE19a	6,67	-	-	Load.VE76a	66,67	-	-
Load.VE20a	66,67	-	-	Load.VE76c	-	-	6,67
Load.VE22b	-	66,67	-	Load.VE77b	-	46,67	-
Load.VE24c	-	-	66,67	Load.VE79a	40	-	-
Load.VE28a	40	-	-	Load.VE82a	6,67	-	-
Load.VE30c	-	-	33,33	Load.VE83c	-	-	66,67
Load.VE31c	-	-	6,67	Load.VE85c	-	-	66,67
Load.VE33a	66,67	-	-	Load.VE86b	-	40	-
Load.VE37a	33,33	-	-	Load.VE88a	66,67	-	-
Load.VE38b	-	40	-	Load.VE90b	-	40	-
Load.VE39b	-	33,33	-	Load.VE92c	-	-	40
Load.VE41c	-	-	66,67	Load.VE94a	66,67	-	-
Load.VE43b	-	6,67	-	Load.VE95b	-	66,67	-
Load.VE46a	66,67	-	-	Load.VE98a	6,67	-	-
Load.VE47	40	40	40	Load.VE100c	-	-	6,67
Load.VE48	66,67	66,67	66,67	Load.VE104c	-	-	6,67
Load.VE49b	-	6,67	-	Load.VE111a	60	-	-
Load.VE49c	-	-	6,67	Load.VE112a	60	-	-
Load.VE51a	66,67	-	-	Load.VE113a	60	-	-
Load.VE52a	20	-	-	Load.VE114a	60	-	-
Load.VE53a	20	-	-	<b>Total</b>	<b>1120</b>	<b>380</b>	<b>787</b>
Load.VE55a	6,67	-	-				
Load.VE58b	-	6,67	-				
Load.VE60a	20	-	-				

Fonte: Elaborado pelo Autor.

## ANEXO C – GERAÇÕES DISTRIBUÍDAS DO SISTEMA

As barras do sistema que contém as gerações distribuídas estão apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4 – Identificação das Gerações Distribuídas no Sistema

(Continua)				(Conclusão)			
Nome da Carga	Potência Ativa (kW)			Nome da Carga	Potência Ativa (kW)		
	Fase A	Fase B	Fase C		Fase A	Fase B	Fase C
Generator.GD4c	-	-	60	Generator.GD58b	-	6,67	-
Generator.GD5c	-	-	60	Generator.GD60a	20	-	-
Generator.GD6c	-	-	60	Generator.GD65a	20	-	-
Generator.GD10a	46,67	-	-	Generator.GD65b	-	20	-
Generator.GD12b	-	6,67	-	Generator.GD65c	-	-	20
Generator.GD16c	-	-	40	Generator.GD66c	-	-	66,67
Generator.GD17c	-	-	40	Generator.GD71a	40	-	-
Generator.GD19a	6,67	-	-	Generator.GD73c	-	-	6,67
Generator.GD20a	40	-	-	Generator.GD75c	-	-	20
Generator.GD22b	-	60	-	Generator.GD76a	60	-	-
Generator.GD24c	-	-	40	Generator.GD76b	-	60	-
Generator.GD28a	40	-	-	Generator.GD76c	-	-	60
Generator.GD30c	-	-	20	Generator.GD77b	-	40	-
Generator.GD33a	20	-	-	Generator.GD79a	20	-	-
Generator.GD37a	20	-	-	Generator.GD86b	-	60	-
Generator.GD38b	-	40	-	Generator.GD88a	6,67	-	-
Generator.GD39b	-	20	-	Generator.GD90b	-	40	-
Generator.GD41c	-	-	60	Generator.GD92c	-	-	20
Generator.GD43b	-	6,67	-	Generator.GD94a	20	-	-
Generator.GD46a	60	-	-	Generator.GD98a	40	-	-
Generator.GD47	40	40	40	Generator.GD104c	-	-	6,67
Generator.GD48	60	60	60	Generator.GD111a	60	-	-
Generator.GD49a	40	-	-	Generator.GD112a	60	-	-
Generator.GD49b	-	40	-	Generator.GD113a	60	-	-
Generator.GD49c	-	-	40	Generator.GD114a	60	-	-
Generator.GD51a	66,67	-	-	<b>Total</b>	<b>953</b>	<b>400</b>	<b>620</b>
Generator.GD52a	20	-	-				
Generator.GD53a	20	-	-				
Generator.GD55a	6,67	-	-				

Fonte: Elaborado pelo Autor.