



Universidade de Brasília - UnB  
Faculdade UnB Gama - FGA  
Engenharia de Energia

# **ANÁLISE DO IMPACTO DE VEÍCULOS ELÉTRICOS NA REDE DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

Autor: Gustavo Schafhauser Boçon  
Orientador: Loana Nunes Velasco

Brasília, DF  
2019



Gustavo Schafhauser Boçon

# **ANÁLISE DO IMPACTO DE VEÍCULOS ELÉTRICOS NA REDE DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia de Energia da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Energia .

Universidade de Brasília - UnB

Faculdade UnB Gama - FGA

Orientador: Loana Nunes Velasco

Brasília, DF

2019

---

Gustavo Schafhauser Boçon

ANÁLISE DO IMPACTO DE VEÍCULOS ELÉTRICOS NA REDE DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA/ Gustavo Schafhauser Boçon. – Brasília, DF, 2019-

76 p. : il. (algumas color.) ; 30 cm.

Orientador: Loana Nunes Velasco

Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade de Brasília - UnB  
Faculdade UnB Gama - FGA , 2019.

1. Carro Elétrico. 2. CEB. I. Loana Nunes Velasco. II. Universidade de Brasília. III. Faculdade UnB Gama. IV. ANÁLISE DO IMPACTO DE VEÍCULOS ELÉTRICOS NA REDE DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

CDU 02:141:005.6

---

Gustavo Schafhauser Boçon

# **ANÁLISE DO IMPACTO DE VEÍCULOS ELÉTRICOS NA REDE DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia de Energia da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Energia .

Trabalho aprovado. Brasília, DF, 13 de dezembro de 2019:

---

**Prof. Dra.:Loana Nunes Velasco**  
Orientador

---

**Prof. Dr.:Alex Reis**  
Convidado 1

---

**Prof. Dr.:Rudi Henri van Els**  
Convidado 2

Brasília, DF  
2019

# Resumo

Com o recente aumento da conscientização ambiental relacionada à emissão de gases de efeito estufa, veículos elétricos vêm ganhando cada vez mais espaço no mundo. Além de apresentar uma propulsão limpa, sem emissões, e serem mais eficientes, estes veículos também possuem a vantagem de poderem ser carregados na própria residência do proprietário, pois sua fonte de energia é um banco de baterias. Um veículo elétrico pode ser carregado em uma tomada, assim como um telefone celular, a diferença está na potência do carregador, sendo consideravelmente maior no caso do veículo. O propósito deste trabalho é avaliar o impacto que o carregamento destes veículos irá causar na rede de distribuição de energia elétrica, visto que o número de carros elétricos circulando tende a aumentar e isto representa uma nova carga conectada ao sistema elétrico. A avaliação deste impacto será realizada por meio de simulações computacionais a partir de um alimentador real da cidade de Brasília-DF. Além disto, também serão realizadas simulações para saber qual o impacto do carregamento do veículo elétrico na tarifa de energia do proprietário.

**Palavras-chaves:** Carro Elétrico, Redes de Distribuição, Sistemas Elétricos.

# Abstract

With the recent increase in environmental awareness related to the emission of greenhouse gases electric vehicles are gaining more and more space in the world. Besides presenting a clean, emission-free propulsion, and be more efficient, these vehicles also have the advantage that they can be charged into the owner's own house, because your power source is a battery bank. An electric vehicle can be charged into an outlet, as well as a cell phone, the difference is in the power of the charger, being considerably greater in the case of the vehicle. The purpose of this work is to evaluate the impact that the charging of these vehicles will cause in the electricity distribution network, since the number of electric cars circulating tends to increase and this represents a new charge connected to the electrical system. The evaluation of this impact will be carried out by means of computational simulations from a real feeder of the city of Brasília-DF. In addition, simulations will also be conducted to determine the impact of electric vehicle charging on the owner's energy tariff.

**Key-words:** Electric Car, Distribution Networks, Electrical Systems.

# Lista de ilustrações

Figura 1 – Dados de consumo energético mundial por setor . . . . .	11
Figura 2 – Quantidade de veículos elétricos em circulação no mundo . . . . .	13
Figura 3 – Pontos de Carregamento em Brasília . . . . .	15
Figura 4 – Demanda de Energia Diária . . . . .	23
Figura 5 – Variação do Preço da Energia Elétrica . . . . .	25
Figura 6 – Demanda de Energia Diária com a Tarifa Branca . . . . .	26
Figura 7 – Circuito Pi Equivalente . . . . .	32
Figura 8 – Fluxos de Potência . . . . .	32
Figura 9 – Condutância e Susceptância . . . . .	33
Figura 10 – Fluxos de Potência Ativa . . . . .	33
Figura 11 – Fluxos de Potência Reativa . . . . .	33
Figura 12 – Fasor Corrente . . . . .	33
Figura 13 – Curva de Carga Diária . . . . .	40
Figura 14 – Função <i>Summary</i> . . . . .	42
Figura 15 – Valores de tensão para cada elemento . . . . .	43
Figura 16 – Valores de corrente elétrica para cada elemento . . . . .	43
Figura 17 – Fluxo de potência para cada trecho do sistema . . . . .	43
Figura 18 – Curva de Carga Diária Alimentador Rural . . . . .	44
Figura 19 – Características da Rede - Caso Normal . . . . .	48
Figura 20 – Características da Rede - Caso Normal . . . . .	49
Figura 21 – Tensões Caso Normal . . . . .	49
Figura 22 – Correntes Caso Normal . . . . .	50
Figura 23 – Curva de Carga . . . . .	50
Figura 24 – Exemplo Programa para alterar valores de carga . . . . .	57
Figura 25 – Cargas antes da alteração . . . . .	57
Figura 26 – Cargas depois da alteração . . . . .	57

# Lista de tabelas

Tabela 1 – Classificação Sistemas de DIstribuição . . . . .	31
Tabela 2 – Tarifas Residenciais - CEB . . . . .	35
Tabela 3 – Comparação Caso Normal x 5% de Veículos Conectados . . . . .	51
Tabela 4 – Comparação Caso Normal x 15% de Veículos Conectados . . . . .	51
Tabela 5 – Comparação Caso Normal x 30% de Veículos Conectados . . . . .	52
Tabela 6 – Comparação Caso Normal x 50% de Veículos Conectados . . . . .	52
Tabela 7 – Comparação Caso Normal x 5% de Veículos Conectados Direto . . . . .	53
Tabela 8 – Comparação Caso Normal x 15% de Veículos Conectados Direto . . . . .	54
Tabela 9 – Comparação Caso Normal x 30% de Veículos Conectados Direto . . . . .	54
Tabela 10 – Comparação Caso Normal x 50% de Veículos Conectados Direto . . . . .	55
Tabela 11 – Comparação Tarifa Normal x Tarifa Branca . . . . .	59
Tabela 12 – Comparação Tarifa Normal x Tarifa Branca . . . . .	60
Tabela 13 – Comparação Tarifa Normal x Tarifa Branca . . . . .	60



# Lista de abreviaturas e siglas

IEA	<i>International Energy Agency</i>
BMW	<i>Bayerische Motoren Werke</i>
HEV	<i>Hybrid Electric Vehicles</i>
PHEV	<i>Plug-in Electric Vehicles</i>
EV	<i>Electric Vehicles</i>
INL	<i>Idaho National Laboratory</i>
EPRI	<i>Electric Power Research Institute</i>
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CEB	Companhia Energética de Brasília
DF	Distrito Federal
kWh	Quilowatt-hora
MVA	Megavolt-Ampère
kVA	QuiloVolt-Ampère
kV	Quilovolt
V	Volt
km	Quilômetro
kVAr	Quilo Volt-Ampère Reativo
SOC	State of Charge
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional

# Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>11</b>
<b>1.1</b>	<b>Contextualização</b>	<b>11</b>
1.1.1	Cenário no Brasil	13
<b>1.2</b>	<b>Justificativas</b>	<b>15</b>
<b>1.3</b>	<b>Objetivos</b>	<b>16</b>
1.3.1	Objetivo Geral	16
1.3.2	Objetivos Específicos	16
<b>1.4</b>	<b>Metodologia</b>	<b>16</b>
<b>2</b>	<b>CARACTERIZAÇÃO DOS TIPOS DE VEÍCULOS ELÉTRICOS</b>	<b>18</b>
<b>2.1</b>	<b>Veículos Elétricos Híbridos</b>	<b>18</b>
2.1.1	Configuração Série	18
2.1.2	Configuração Paralela	19
2.1.3	Configuração Série-Paralela	19
<b>2.2</b>	<b>Veículos Elétricos Híbridos <i>Plug-in</i></b>	<b>19</b>
<b>2.3</b>	<b>Veículos Elétricos a Bateria</b>	<b>20</b>
<b>3</b>	<b>CARREGAMENTOS RESIDENCIAL</b>	<b>22</b>
<b>3.1</b>	<b>Carregamento Tradicional</b>	<b>22</b>
<b>3.2</b>	<b>Carregamento Com Benefício Tarifário</b>	<b>24</b>
3.2.1	Tarifa Branca	24
<b>4</b>	<b>POSSÍVEIS IMPACTOS</b>	<b>27</b>
<b>4.1</b>	<b>Impactos</b>	<b>27</b>
4.1.1	Capacidade de Geração	27
4.1.2	Impacto no Nível de Tensão e Corrente	28
4.1.3	Impacto nos Condutores e Transformadores	28
<b>4.2</b>	<b>Soluções</b>	<b>28</b>
<b>5</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>30</b>
<b>5.1</b>	<b>Sistemas Elétricos</b>	<b>30</b>
<b>5.2</b>	<b>Fluxo de Potência</b>	<b>31</b>
5.2.1	Fluxo de Potência pelo Método Newton-Raphson	32
<b>5.3</b>	<b>Curva de Carga</b>	<b>34</b>
<b>6</b>	<b>OPENDSS</b>	<b>36</b>
<b>6.1</b>	<b>Introdução</b>	<b>36</b>

<b>6.2</b>	<b>Parâmetros</b> . . . . .	<b>36</b>
6.2.1	Circuito . . . . .	36
6.2.2	Linha . . . . .	37
6.2.3	Carga . . . . .	37
6.2.4	Transformador . . . . .	38
<b>6.3</b>	<b>Exemplos Práticos</b> . . . . .	<b>39</b>
<b>7</b>	<b>RESULTADOS</b> . . . . .	<b>45</b>
<b>7.1</b>	<b>Estudo de Caso</b> . . . . .	<b>45</b>
7.1.1	Comportamento do Proprietário . . . . .	47
<b>7.2</b>	<b>Simulações OpenDSS</b> . . . . .	<b>49</b>
7.2.1	Simulação sem nenhum veículo conectado à rede. . . . .	49
7.2.2	Simulações Considerando Cargas Distribuídas . . . . .	50
7.2.2.1	Porcentagem de Veículos Sendo Carregados - 5% . . . . .	51
7.2.2.2	Porcentagem de Veículos Sendo Carregados - 15% . . . . .	51
7.2.2.3	Porcentagem de Veículos Sendo Carregados - 30% . . . . .	52
7.2.2.4	Porcentagem de Veículos Sendo Carregados - 50% . . . . .	52
7.2.3	Simulações Considerando Cargas Diárias . . . . .	53
7.2.3.1	Porcentagem de Veículos Sendo Carregados - 5% . . . . .	53
7.2.3.2	Porcentagem de Veículos Sendo Carregados - 15% . . . . .	54
7.2.3.3	Porcentagem de Veículos Sendo Carregados - 30% . . . . .	54
7.2.3.4	Porcentagem de Veículos Sendo Carregados - 50% . . . . .	55
7.2.4	Programa auxiliar para alteração de cargas . . . . .	55
<b>7.3</b>	<b>Simulações Tarifárias</b> . . . . .	<b>58</b>
7.3.1	Diferenças entre tarifas . . . . .	59
7.3.1.1	Curva de Carga Normal . . . . .	59
7.3.1.2	Curva de Carga fora do Pico . . . . .	60
<b>8</b>	<b>CONCLUSÃO</b> . . . . .	<b>62</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> . . . . .	<b>65</b>
	<b>APÊNDICES</b> . . . . .	<b>67</b>
	<b>APÊNDICE A – RESULTADOS OPENDSS</b> . . . . .	<b>68</b>

# 1 Introdução

## 1.1 Contextualização

Nos dias de hoje, temos que o transporte e a mobilidade possuem um papel representativo nas economias mundiais e são atividades necessárias no contexto da sociedade atual. O transporte está presente em quase tudo que uma sociedade moderna convive, como locomoção pessoal e o deslocamento de mercadorias. A figura a seguir, fornecida pela *International Energy Agency* (IEA), mostra a porcentagem que cada setor econômico consome de energia no mundo, ficando evidente a relevância do transporte neste quesito (VONBUN, 2015).

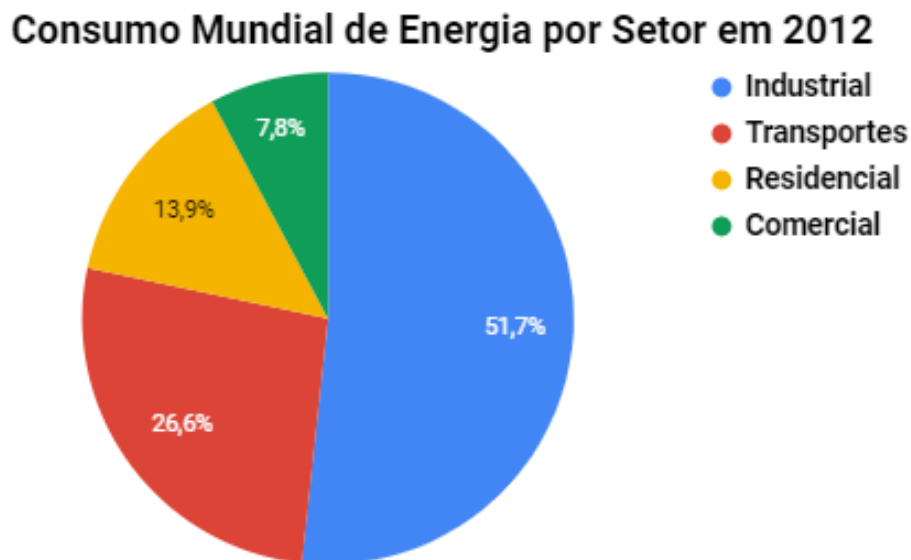


Figura 1 – Dados de consumo energético mundial por setor

Além disso, tem-se que a grande maioria dos veículos utilizados nos transportes são veículos movidos a motores de combustão interna, e devido à grande preocupação ambiental relacionada à emissão de gases de efeito estufa, uma solução encontrada para amenizar este impacto de veículos automotores ao meio ambiente é a utilização de veículos elétricos. Comparados aos veículos à combustão interna, os veículos elétricos apresentam um impacto ambiental reduzido e surgem como uma tendência inovadora no mercado de transportes mundial (RIECK; MACHIELSE; DUIN, 2017).

Os veículos elétricos apareceram na história há muitos anos atrás, tendo relatos da década de 1830 das primeiras demonstrações experimentais de veículos elétricos nos Estados Unidos e na Europa. No século XIX foi quando o veículo elétrico começou a ganhar

força, disputando um lugar no mercado junto com os veículos a gasolina e a vapor, porém foi perdendo espaço devido a baixa autonomia quando comparado aos outros tipos de veículo, principalmente os movidos à gasolina. Os veículos elétricos só voltaram a ser citados a partir dos anos 70 e ganhando força a partir dos anos 2000, reaparecendo com a importante função de substituírem os veículos movidos a combustão interna (SILVA, 2017).

Além da vantagem de serem menos nocivos ao meio ambiente, os veículos elétricos apresentam outros benefícios quando comparados aos veículos a combustão interna. O motor elétrico responsável pela propulsão em um veículo elétrico é aproximadamente 3 vezes mais eficiente que um motor a combustão interna. Os motores elétricos também são extremamente silenciosos, o que traria mais conforto, reduzindo a poluição sonora principalmente no caso de grandes centros urbanos, tornando o ambiente mais agradável. Outra vantagem do motor de veículos elétricos é o torque instantâneo do motor, alcançando uma performance máxima mais rápida quando exigido pelo condutor. Além disso, veículos elétricos apresentam a vantagem de poderem ser carregados na própria residência do proprietário, visto que a fonte de energia para recarregar suas baterias é a eletricidade, sem a necessidade de se mover até um posto de abastecimento, fazendo com que o carro seja apenas mais um produto que o condutor conecta em uma tomada de sua residência (VONBUN, 2015).

Porém, apesar destas vantagens o veículo elétrico possui desvantagens que são cruciais para determinar o motivo pelo qual os veículos elétricos não terem apresentado um aumento significativo nas vendas. A fonte de energia para o motor elétrico são as células do banco de baterias alocado no carro, entretanto, a densidade energética destas baterias é muito menor do que a densidade energética dos combustíveis usualmente utilizados nos veículos automotores, como gasolina, diesel e etanol. Isto acaba interferindo negativamente na autonomia da maioria dos veículos elétricos, fazendo com que não seja possível percorrer grandes distâncias sem a necessidade da realização de um carregamento. Além disto, veículos elétricos são mais caros que veículos a combustão interna de mesma categoria, devido à tecnologia embarcada, como as baterias, motor e inversor, a bateria é o componente mais caro de um veículo elétrico (GAONAC'H, 2016).

Outra desvantagem é com relação à recarga das baterias do veículo elétrico. Um veículo a combustão interna pode ser totalmente abastecido em torno de 5 minutos, já um veículo elétrico depende do sistema de carregamento que está sendo utilizado, demorando em média 6 horas para ter uma carga completa das baterias. Em alguns casos é possível carregar completamente um veículo elétrico em menos de 1 hora, porém este carregamento exige um sistema de carga diferenciado e conseqüentemente mais caro.

Apesar destas desvantagens críticas, estudos e avanços têm sido realizados em veículos elétricos e estes estão ficando cada vez mais viáveis e cumprindo com o papel

proposto de futuros substitutos dos veículos a combustão interna. O número de veículos elétricos sendo utilizados ao redor do mundo vem crescendo cada vez mais, como pode ser observado na figura abaixo fornecida pela IEA em 2017.

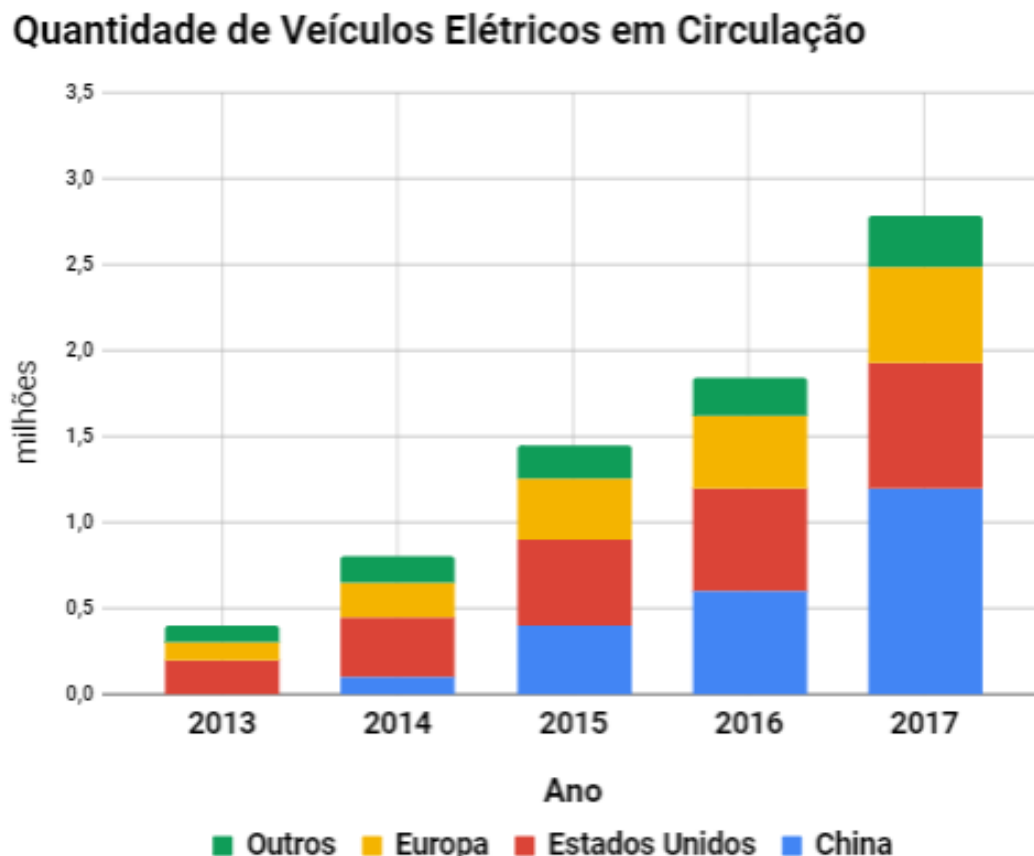


Figura 2 – Quantidade de veículos elétricos em circulação no mundo

Portanto, é de se esperar que a quantidade de veículos elétricos em circulação aumente consideravelmente nos próximos anos até ser considerado como maioria, substituindo os veículos à combustão interna. Segundo alguns estudos aqui no Brasil, estima-se que até em 2030 existam cerca de 5,7 milhões de veículos elétricos fazendo parte da frota nacional de veículos. Além disso, estima-se que o crescimento mais intenso desta frota aconteça entre 2021 e 2025 (MARIOTTO et al., 2017).

### 1.1.1 Cenário no Brasil

Atualmente no Brasil, temos que o número de veículos elétricos em circulação nem chega a 0,005%, devido ao fato de o veículo elétrico não ser viável e também às poucas opções de compra no mercado. Existem aproximadamente 9 mil veículos elétricos no Brasil, segundo a Associação Brasileira de Veículos Elétricos. Atualmente, as cidades mais populosas do Brasil já possuem pontos de recarga espalhados pela cidade, para

atender à demanda (SOUSA, 2015). O recorde é São Paulo, com aproximadamente 50 pontos de recarga distribuídos por toda a cidade.

Com relação ao desafio de permitir a usabilidade de veículos elétricos para percorrer grandes distâncias, como viagens interestaduais, já existem projetos em andamento para a construção de pontos de recarga distribuídos pelas principais rodovias brasileiras. O ideal é que nas principais rodovias brasileiras existam pontos de carregamento bem distribuídos para garantir que o usuário de um veículo elétrico tenha onde recorrer caso a carga da bateria de seu veículo venha a acabar, sendo pontos de carregamento similares aos postos de combustíveis encontrados ao longo das rodovias.

O principal projeto é uma parceria da BMW com a Electric Mobility Brazil, que instalou a primeira eletrovia do Brasil, conectando as cidades de São Paulo ao Rio de Janeiro, um trecho em torno de 434 km. Existem 6 estações de carregamento distribuídas com um intervalo médio de 80 km entre cada uma. O equipamento instalado é compatível com todos os plugues dos veículos elétricos, a carga foi gratuita por 6 meses, após 6 meses o custo do carregamento do veículo ficou a critério do posto no qual o carregador está instalado (VELA, 2018).

Para a cidade de Brasília, cidade escolhida para este trabalho, temos 21 carregadores de veículos elétricos disponíveis pela cidade, todos capazes de carregar veículos elétricos com o plugue Tipo 2, como pode ser visto na imagem abaixo, obtida no software PlugShare, usado para indicar pontos urbanos de carregamento de veículos elétricos ao redor do mundo.

Em Brasília, a maioria dos pontos de carregamento estão instalados em shoppings e mercados, onde o cliente não paga pelo carregamento, paga apenas a taxa de estacionamento comum. Existe uma estação de recarga na Universidade de Brasília, esta em sua frota de ônibus para o transporte de estudantes já possui um ônibus elétrico. Há também uma estação de carregamento em um hotel no centro da cidade. Existe apenas 1 estação de carregamento que não se encontra em algum local para outro fim, como shoppings ou hotéis, localizada em um posto de abastecimento comum para veículos de combustão interna. O cenário para carregar veículos elétricos nos pontos espalhados pela cidade de Brasília ainda é muito ruim, o que faz com que os proprietários de veículos elétricos façam o seu carregamento principalmente em sua própria residência.

Portanto, para este trabalho, será considerado que os veículos elétricos serão carregados exclusivamente em casa. A presença de pontos de recarga em Brasília ainda é pequena, mas espera-se que, com o aumento das vendas de veículos elétricos, ocorram investimentos em pontos de recarga.

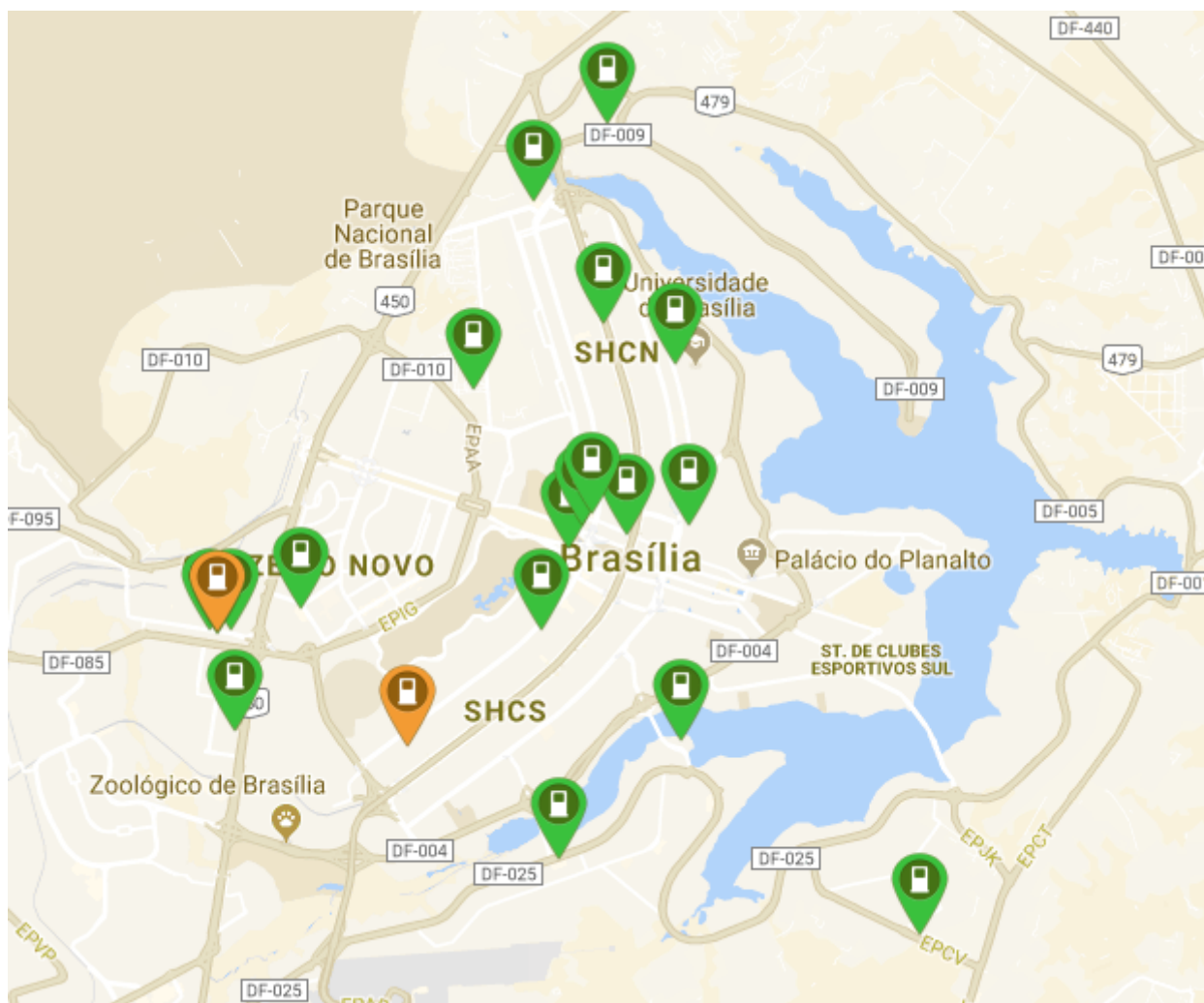


Figura 3 – Pontos de Carregamento em Brasília

## 1.2 Justificativas

Certamente os veículos elétricos são mais frequentes em países desenvolvidos, devido a vários fatores, como poder de compra dos consumidores, incentivos fiscais e estrutura para o carregamento destes veículos, promovendo esta nova tecnologia (MARIOTTO et al., 2017). Por ser um veículo que possui uma fonte de energia diferente daqueles veículos que foram utilizados até hoje pela sociedade, não podendo aproveitar já os postos de abastecimento de combustíveis, a introdução em grande escala de veículos elétricos na sociedade requer possivelmente uma reestruturação do sistema elétrico para que seja possível o carregamento destes nas residências e em pontos de recarga espalhados pela cidade.

Atualmente, no momento da realização deste trabalho, são poucos os veículos elétricos vendidos oficialmente no Brasil, e poucos também os veículos híbridos. Porém, é esperado que em 2020 mais veículos elétricos sejam importados regularmente no Brasil, aumentando as opções deste tipo de veículo no mercado nacional, como o Nissan Leaf e o



Chevrolet Bolt. Dentre os veículos híbridos aqui vendidos, apenas o BMW i3 e o BMW i8 possuem suas baterias carregadas diretamente na tomada, os outros são carregados por sistemas inteligentes que aproveitam a inércia no movimento do veículos, como veremos especificamente no próximo capítulo. Sendo assim, pode-se perceber que o veículo elétrico terá uma participação cada vez mais frequente no cotidiano do cidadão brasileiro.

Com isso, torna-se importante avaliar as atuais condições e as possíveis mudanças necessárias na estrutura da rede de distribuição para tornar acessível a utilização de veículos elétricos no Brasil. Vendo os possíveis cenários que podem influenciar nesta análise.

A ideia deste presente trabalho é a realização de uma análise do impacto de veículos elétricos na rede de distribuição de energia elétrica. A análise será feita por meio de simulações computacionais de um alimentador na cidade de Brasília - DF para se identificar as possíveis mudanças necessárias no sistema elétrico.

## 1.3 Objetivos

### 1.3.1 Objetivo Geral

Realizar um estudo sobre o impacto que o carregamento de veículos elétricos causará nas redes de distribuição de energia elétrica, identificando a necessidade de reestruturação da mesma. Identificar o impacto econômico do carregamento de um veículo elétrico para seu proprietário.

### 1.3.2 Objetivos Específicos

- Realizar simulações computacionais com o software OpenDSS para um alimentador real da cidade de Brasília-DF, considerando os veículos elétricos como uma nova carga no sistema.
- Realizar análises dos resultados e identificar se há conservação da estabilidade e qualidade da rede, havendo ou não a necessidade de reestruturação da mesma.
- Identificar qual a viabilidade econômica do carregamento residencial destes veículos em dois cenários de tarifa, tarifa Normal e tarifa Branca

## 1.4 Metodologia

Primeiramente, foi realizada uma pesquisa bibliográfica para estabelecer uma base teórica para o trabalho, para análise de dados e futuras conclusões. Simultaneamente

foi estabelecido um estudo de caso para realização de simulações a fim de se obter um resultado realista do proposto no trabalho.

As simulações serão realizadas no software OpenDSS a partir de dados de um alimentador de uma região de Brasília - DF. As simulações realizadas foram feitas com base no cálculo do fluxo de potência do alimentador proposto, identificando as variações de tensão e corrente. As simulações também levaram em conta diferentes níveis de penetração de veículos elétricos na rede, pois trata-se de um produto que ainda não é economicamente viável para a maioria da população, mas que nos próximos anos tende a estar mais presente no mercado nacional.

Com as simulações realizadas e com a base teórica adquirida será possível realizar um parecer sobre as condições do sistema elétrico e a necessidade de mudanças na estrutura deste.

## 2 Caracterização dos Tipos de Veículos Elétricos

Neste capítulo teremos uma breve explicação sobre os tipos de veículos que utilizam a tração elétrica para sua locomoção e quais destes veículos levaremos em consideração para a realização deste trabalho. Veículos elétricos são todos aqueles veículos que utilizam um ou mais motores elétricos como forma de tração.

Não necessariamente um veículo elétrico possui apenas tração elétrica, alguns apresentam uma combinação entre um motor elétrico e um motor de combustão interna para tracionar o veículo, são os chamados veículos híbridos. Os veículos híbridos possuem algumas variações que veremos a seguir (VONBUN, 2015).

### 2.1 Veículos Elétricos Híbridos

Veículos elétricos híbridos, ou HEV's (*Hybrid Electric Vehicles*) são todos aqueles veículos que utilizam da combinação de um motor elétrico com um motor de combustão interna para a sua locomoção. Porém, o motor a combustão é o maior responsável por tracionar o veículo, sendo o motor elétrico utilizado apenas como um motor auxiliar, utilizado principalmente nas ocasiões em que ele é mais eficiente quando comparado ao motor de combustão, como no caso onde o veículo se encontra operando em baixas rotações.

Com isso, os HEV's apresentam um rendimento melhor se comparados aos veículos usuais de motores de combustão interna, e são apontados como o primeiro passo para a substituição dos veículos tradicionais por veículos elétricos. Como o principal motor utilizado nos HEV's ainda é o motor de combustão, temos que a capacidade do banco de baterias destes veículos não é tão expressiva, e a sua recarga se dá pelo freio regenerativo ou pela própria rotação do motor de combustão, dependendo da configuração que o HEV foi fabricado. Essa configuração pode ser dada de três formas distintas, como veremos a seguir (MOREIRA, 2013).

#### 2.1.1 Configuração Série

Neste tipo de veículo híbrido, o motor de combustão é utilizado apenas como um gerador de eletricidade para o motor elétrico e utilizado para recarregar suas baterias. Apenas o motor elétrico realiza a tração do veículo.

Esta configuração não é muito frequente em automóveis mas é muito utilizada em locomotivas a diesel. A vantagem é que nela o motor de combustão pode ser utilizado em

seu ponto ótimo de operação, fornecendo a corrente necessária para o motor elétrico ou para recarregar as baterias, geralmente sendo utilizado em baixas velocidades (EMADI; LEE; RAJASHEKARA, 2008).

### 2.1.2 Configuração Paralela

Nesta configuração tanto o motor elétrico quanto o motor de combustão são responsáveis pela tração do veículo, sendo o motor de combustão utilizado como o motor principal e o motor elétrico como um motor suplementar a depender da demanda exigida.

Com um sistema inteligente, quando o motor de combustão é submetido a uma situação fora do seu nível ótimo de operação, o motor elétrico é acionado para que não se tenha perda na eficiência, garantindo um economia final de combustível considerável. Para recarregar o banco de baterias do veículo o próprio motor elétrico atua como um gerador, não podendo ser utilizado para tracionar o veículo quando este se encontra carregando as baterias (SIMON, 2013).

### 2.1.3 Configuração Série-Paralela

Na configuração série-paralela temos uma mistura das duas configurações vistas acima, buscando unir os pontos positivos das duas. Trata-se de um veículo que possui um sistema mais complexo que os vistos anteriormente, mas que com uma correta utilização, torna-se o sistema mais eficiente.

Tanto o motor de combustão como o motor elétrico são responsáveis pela tração do veículo, porém, esta pode variar de acordo com a situação a que o veículo está submetido. No caso de baixas rotações, onde o motor elétrico é mais eficiente que o motor de combustão, apenas o motor elétrico é responsável pela tração, da mesma maneira quando o veículo está em altas velocidades a participação do motor de combustão na tração é mais ativa do que do motor elétrico (CHAN, 2002).

O motor de combustão nesta configuração atua como gerador para recarregar o banco de baterias, assim como na configuração série, mas também as baterias podem ser recarregadas pelo próprio motor elétrico como no caso de frenagem regenerativa.

## 2.2 Veículos Elétricos Híbridos *Plug-in*

Os veículos elétricos híbridos *plug-in* ou PHEV's são veículos que também possuem um motor de combustão interna e um motor elétrico. A diferença destes veículos para os HEV's é de que o banco de baterias dos PHEV's é consideravelmente maior do que dos HEV's, sendo assim, os PHEV's possuem a possibilidade de que suas baterias sejam carregadas conectadas diretamente à rede elétrica.

Os PHEV's geralmente possuem um sistema inteligente similar à configuração série-paralela, mas podem também possuir configurações apenas série ou apenas paralela, fazendo com que as baterias sejam recarregadas também com o veículo em movimento. Com isso, estes veículos conseguem ter um alcance maior com relação aos HEV's.

O consumo de energia nos PHEV's pode ocorrer de várias maneiras diferentes, como no caso de carga sustentada em que o sistema do veículo tenta manter o nível de carga da bateria constante, recarregando-a ao longo da utilização do veículo. Existe também o modo em que o veículo utiliza apenas o motor elétrico, sem o auxílio do motor de combustão e vice-versa (CHAN, 2002).

Apesar do banco de baterias dos PHEV's ter uma capacidade maior do que o banco de baterias dos HEV's, tem-se que não se compara com o banco de baterias de um veículo puramente elétrico, como veremos a seguir.

## 2.3 Veículos Elétricos a Bateria

Os veículos elétricos a bateria ou EV's são os veículos que utilizam apenas motores elétricos para a sua tração, sem utilizar a queima de combustíveis fósseis para sua locomoção, apenas a energia proveniente do banco de baterias.

Como o banco de baterias é a única fonte energia para o motor do veículo, temos que em EV's o banco de baterias é notadamente maior do que os bancos de baterias encontrados nos PHEV's. Sendo assim, o banco de baterias dos EV's é carregado principalmente quando o veículo é conectado à rede de eletricidade, mas também pode ser carregado com a tecnologia do freio regenerativo (EMADI; LEE; RAJASHEKARA, 2008).

Com relação ao carregamento, os veículos elétricos à bateria podem apresentar o carregamento em corrente contínua e corrente alternada, dependendo da tecnologia instalada no veículo e do carregador a ser utilizado. A vantagem do carregamento contínuo é que este é usualmente mais potente, sendo capaz de realizar o carregamento do veículo mais rápido.

As maiores dificuldades para a difusão dos veículos totalmente elétricos com relação aos veículos híbridos estão no seu preço, mas principalmente em sua autonomia. O veículo totalmente elétrico ainda possui uma autonomia não muito atrativa, além do fato de que os veículos híbridos podem ser abastecidos em qualquer posto de combustível, processo que é notavelmente mais rápido do que a recarga de um veículo elétrico a bateria.

Futuramente ainda se espera a utilização de veículos elétricos movidos a células de hidrogênio, tecnologia que encontra já em desenvolvimento trazendo mais uma alternativa para veículos automotores não poluentes. A diferença é que os veículos elétricos movidos a partir de células de hidrogênio serão mais eficientes que os veículos elétricos a

bateria.

Portanto, tendo em vista que este trabalho visa analisar o impacto do carregamento de veículos elétricos na rede de distribuição de energia elétrica, temos que os veículos a serem considerados para a realização deste trabalho serão os PHEV's e os EV's, que são os únicos que são conectados à rede para recarregar as baterias.

## 3 Carregamento Residencial

Com relação ao carregamento de veículos elétricos e híbridos plug-in, este pode ser realizado de duas maneiras, a condutiva e a indutiva. A recarga condutiva utiliza condutores físicos que são conectados ao veículo, semelhante a qualquer outro equipamento comum residencial, como um telefone celular ou um notebook. Já a recarga indutiva ocorre com base no princípio da indução eletromagnética, similar a um transformador de potência. Atualmente os sistemas de recarga condutiva já estão bem consolidados enquanto os sistemas de recarga indutiva ainda se encontram em desenvolvimento, por isso o carregamento condutivo é o mais utilizado para carregar as baterias dos veículos elétricos e será o carregamento considerado neste trabalho (SIMON, 2013).

A vantagem da recarga condutiva é que esta pode ser realizada em tomadas padronizadas residenciais ou em estações de carregamento rápido situadas em locais estratégicos. No caso do Brasil, temos que os níveis de tensão padrões para a tomada residencial são 380/220 V e 220/127 V, que são níveis de tensão razoáveis para a realização do carregamento residencial dando autonomia para o veículo rodar no dia a dia.

Para este trabalho, definiremos dois tipos de casos de carregamento para as futuras simulações. Em ambos não há comunicação do veículo com a rede, sendo assim um carregamento sem controle e dependente do proprietário do veículo. O primeiro caso será de um cenário de carregamento tradicional, onde o proprietário poderá conectar seu veículo à rede no horário que for mais conveniente de acordo com a demanda de seu veículo, este terá o nome de carregamento tradicional. O segundo caso também será de um carregamento livre, porém levando em conta que o proprietário do veículo possui um contrato de tarifa branca com a distribuidora de energia local. Sendo assim, podendo carregar seu veículo no horário que lhe for mais conveniente, porém pendendo a carregar o veículo nos horários com o maior benefício econômico. Este tipo de carregamento terá o nome de carregamento tarifário.

### 3.1 Carregamento Tradicional

O carregamento livre não estabelece nenhuma restrição ao proprietário do veículo com relação ao seu horário de carregamento, sendo assim o carregamento podendo ser realizado em qualquer horário do dia, dependendo da necessidade do uso do veículo. Porém, podemos imaginar que neste caso teremos frequência pequena de carregamentos esporádicos ao longo do dia mas teremos uma frequência relevante entre o final da tarde e o começo da madrugada.

Com o carregamento livre, os veículos elétricos terão um comportamento similar a uma carga simples, tendo seu funcionamento expressivo no horário de pico da rede de distribuição de energia, sendo este considerado de 18h às 21h do dias úteis. Isso acontecerá pois este é o horário em que os proprietários dos veículos estarão retornando do trabalho para suas residências e ao chegarem em casa conectarão seu veículo para recarregá-lo e sendo assim, garantindo que no dia seguinte seu veículo tenha o banco de baterias com carga completa (GAONAC'H, 2016).

É nítido que este tipo de carregamento terá um impacto significativo na demanda de potência no horário de pico, devido ao fato de que os carregadores de veículos elétricos geralmente possuem uma potência na faixa de 3,5 kW, sendo considerado uma carga expressiva em se tratando de residências, além de que podemos estimar que o tempo médio de recarga será entre 2h e 6h, dependendo do *State of Charge* (SOC) da bateria (MARIOTTO et al., 2017).

O Idaho National Laboratory (INL) realizou um estudo em 2015 na cidade de São Diego, no estado da Califórnia nos Estados Unidos, onde foi mensurado a variação da demanda de potência para o carregamento doméstico de veículos elétricos ao longo do dia. Neste estudo pode-se observar a variação da demanda de potência que ocorre após as 18h, confirmando o visto anteriormente, como pode ser observado na figura abaixo:

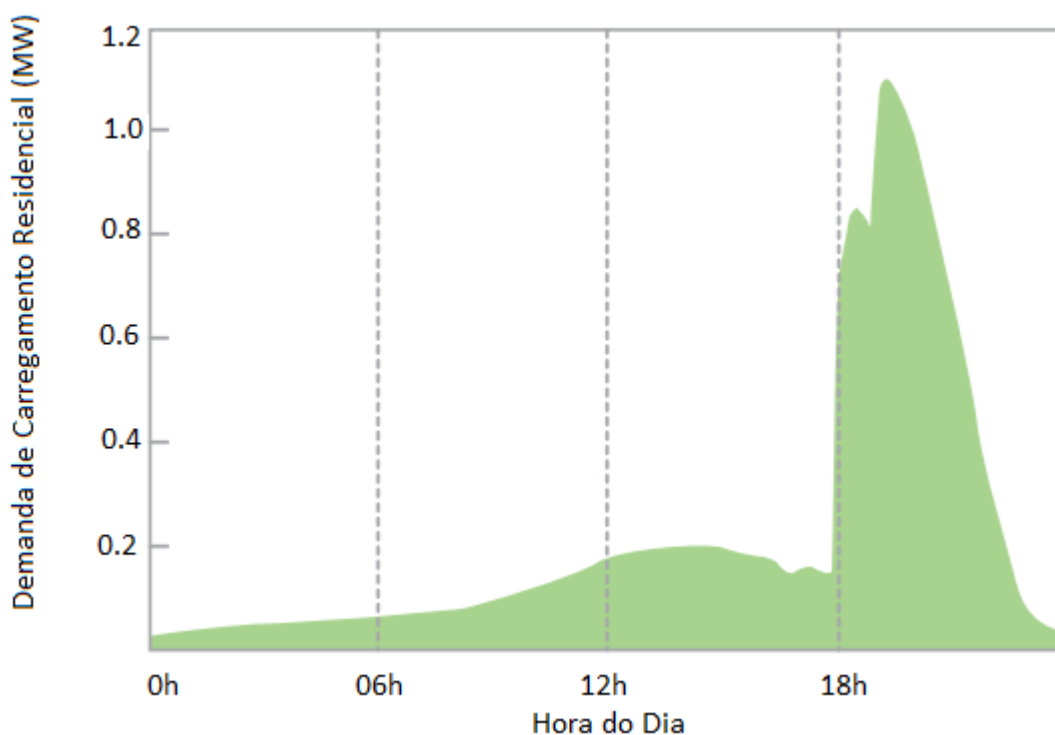


Figura 4 – Demanda de Energia Diária  
(INL, 2018)

Com isso, usaremos estes dados como base para a realização das simulações para



o caso do carregamento livre, para se obter um resultado mais próximo da realidade.

## 3.2 Carregamento Com Benefício Tarifário

Semelhante ao carregamento livre, no carregamento tarifário os proprietários não terão nenhuma restrição com relação ao carregamento de seu veículo, porém, neste caso de carregamento há um incentivo fiscal com diferentes preços de tarifa de energia elétrica. Esta variação do preço da tarifa vai depender do horário de utilização da rede, fazendo com que o usuário procure sempre carregar seu veículo no horário mais barato (GAONAC'H, 2016).

Como o carregamento residencial de veículos elétricos possui uma demanda considerada de energia, temos que a tarifa branca será um atrativo para proprietários de veículos elétricos. Com este incentivo, temos que o carregamento será realizado em um horário diferente do previsto pelo carregamento livre. Com a utilização da tarifa branca, o proprietário do veículo, a fim de obter um desconto considerável na tarifa mensal de energia elétrica, deverá recarregar seu veículo até antes das 17h e após as 22h, fazendo com que haja um deslocamento da demanda de energia ao longo do dia, reduzindo significativamente a demanda no horário de pico (MOREIRA, 2013).

### 3.2.1 Tarifa Branca

A Tarifa Branca é um novo modelo tarifário que busca trazer aos clientes de todas as centrais distribuidoras de energia elétrica do Brasil uma nova opção de contrato, trazendo a possibilidade de diminuir a conta de energia no final do mês.

Esta nova opção de contrato oferece ao consumidor a possibilidade de adquirir uma variação do preço da energia conforme o dia e o horário de uso. Este tipo de incentivo já era realizado entre as distribuidoras e alguns consumidores, porém, é a primeira vez em que consumidores de baixa tensão, como residências e pequenos comércios, poderão ter acesso à descontos na tarifa mensal, dependendo do horário de utilização da energia, algo antes só possível para consumidores específicos, como grandes centros comerciais e indústrias.

A tarifa branca entrou em vigor em 2018 em todo o Brasil, mas primeiramente apenas para consumidores com média mensal de consumo acima de 500 kWh. A partir de 2019, consumidores com média mensal acima de 250 kWh também poderão aderir à tarifa branca e por último, em 2020, qualquer consumidor de baixa tensão poderá aderir à tarifa. O objetivo da tarifa branca é deslocar a demanda de energia de forma mais equilibrada ao longo do dia, reduzindo a demanda de pico que ocorre entre 18h e 21h dos dias úteis. E para incentivar este deslocamento, há um desconto do custo de energia caso o consumo seja realizado fora do horário de pico. Em contrapartida, há um aumento

considerável no custo de energia caso o consumo seja realizado no horário de pico. Esses horários estabelecidos como horários de pico podem variar entre as distribuidoras de energia elétrica (ANEEL, 2017).

No caso da tarifa branca da CEB, temos que o consumidor aderindo à esta tarifa terá um desconto de 14,5% na sua conta quando realizar o consumo de energia no horário fora de ponta, sendo este das 22h às 17h. Em compensação, o consumo realizado das 17h às 18h e das 21h às 22h, chamado de período intermediário, haverá um aumento de 16,9% no preço da energia. E no caso do consumo realizado no horário de ponta, de 18h às 21h, temos um aumento considerável de 80,6% no preço da energia (CEB, 2018).

A variação do preço da energia com a tarifa branca pode ser mais facilmente analisada na figura 3, localizada na página abaixo, onde de 22h às 17h o preço da energia é o mesmo, de 85,5% do preço da energia final.

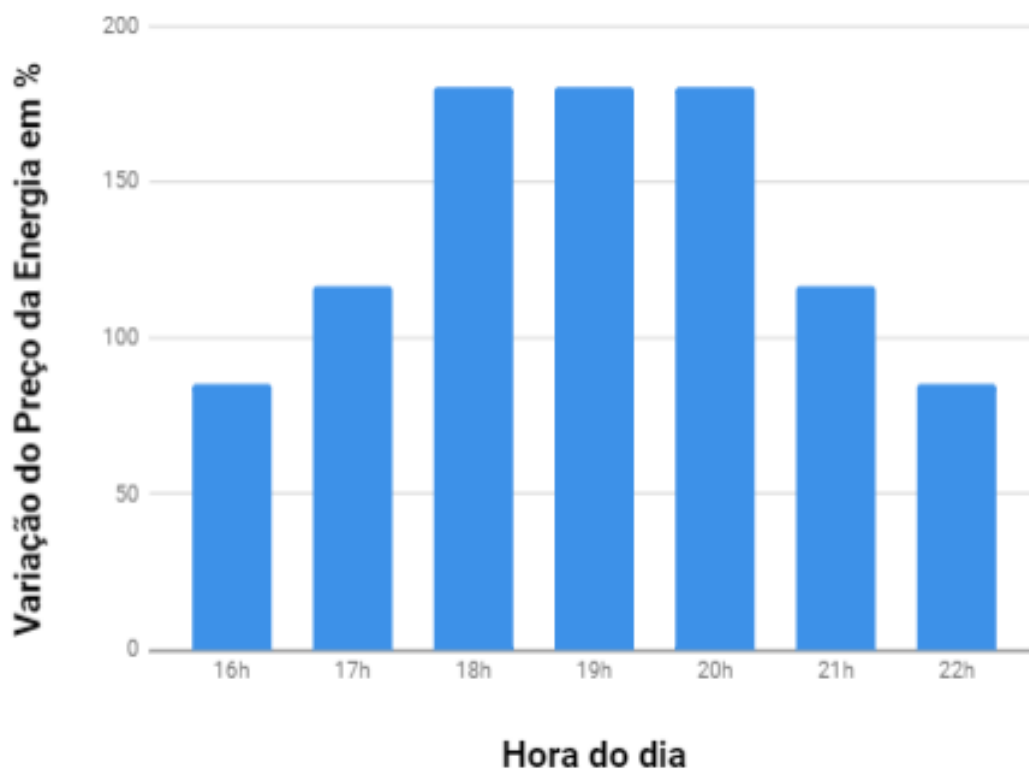


Figura 5 – Variação do Preço da Energia Elétrica

O consumidor interessado em aderir à tarifa branca deverá identificar seu perfil de consumo, verificando se há realmente vantagem em adotar a tarifa branca. Caso contrário, a conta de energia no final do mês pode ficar mais cara do que com a tarifa convencional.

Caso o consumidor identifique que aderir à tarifa branca será um benefício econômico, o mesmo deverá realizar uma solicitação a sua central distribuidora local e esta deverá atender ao pedido em até 30 dias, sendo que se houver necessidade da instalação de um novo medidor, este será custeado pela distribuidora (ANEEL, 2017).

Se o consumidor aderido à tarifa branca não tiver resultados satisfatórios com a economia mensal, o mesmo poderá solicitar o retorno à tarifa convencional e a distribuidora novamente deverá atender ao pedido em até 30 dias. Caso o cliente queira voltar a tarifa branca, o mesmo deverá respeitar um período de carência de 80 dias.

É possível que haja um aumento na frequência de veículos elétricos sendo carregados de manhã até o final da tarde com a utilização da tarifa branca, porém é mais provável que haja um aumento significativo na frequência de carregamentos após as 22h. Seguindo o mesmo princípio do carregamento livre, os proprietários estarão utilizando o veículo ao longo do dia e ao retornarem para casa conectarão o veículo à rede, porém, com o incentivo da tarifa branca, esta conexão será realizada principalmente a partir das 22h, para garantir que o veículo possua autonomia para o dia seguinte.

Com base no estudo feito pelo INL, podemos estimar que com a adesão à tarifa branca dos proprietários de veículos elétricos, a demanda de carregamento residencial será mais espalhada ao longo do dia, como na figura abaixo:

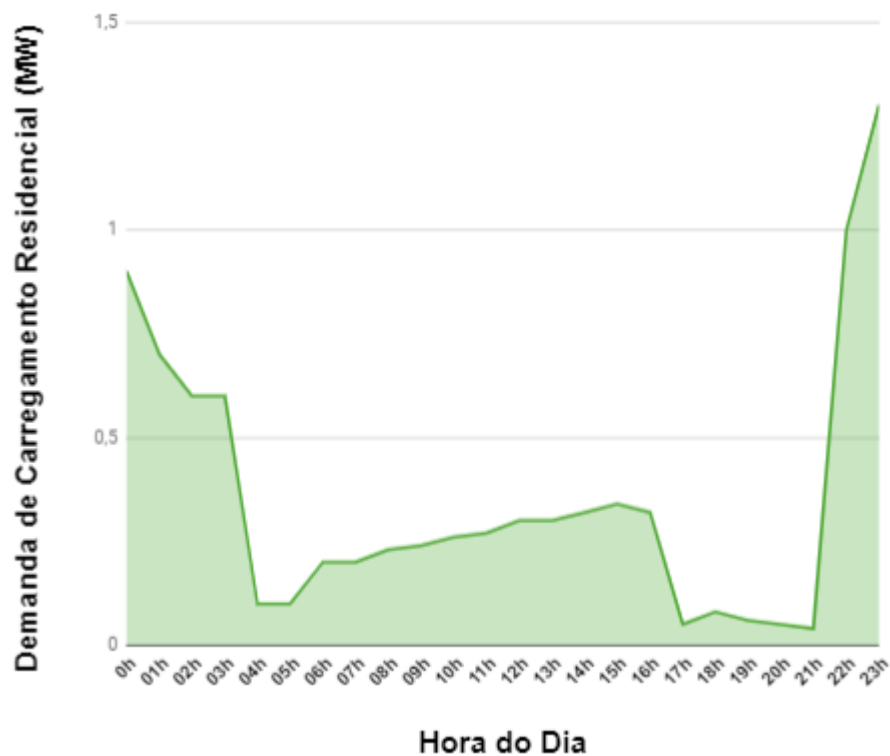


Figura 6 – Demanda de Energia Diária com a Tarifa Branca

## 4 Possíveis Impactos

O aumento da utilização de veículos elétricos, resultando em um aumento de carregamentos residenciais, representa um novo tipo de carga a ser inserido na rede de distribuição de energia elétrica. Esta nova carga irá alterar as condições de operação da rede, principalmente aumentando consideravelmente a potência de ponta demandada ([SILVA, 2017](#)).

Estas modificações nas cargas podem causar alguns impactos na qualidade da energia elétrica distribuída, como queda ou desequilíbrio de tensão e alguns impactos na própria rede e em alguns equipamentos como sobrecarga de condutores e transformadores. A qualidade da energia elétrica distribuída é perdida quando se tem qualquer variação fora do padrão na magnitude, frequência e forma de onda da corrente ou tensão elétrica.

Com relação à frequência, alguns equipamentos residenciais e da própria rede de distribuição não aguentam variações da frequência, sendo sensíveis e apresentando o risco de se danificarem caso algum distúrbio deste tipo venha a acontecer. Por isso, por questões de segurança muitas partes do sistema são desligadas evitando prejuízos maiores, ocorrendo um *black-out*. Com relação à tensão, variações na tensão fora do padrão nominal podem sobrecarregar as linhas, causando um colapso da rede e fadigando os equipamentos da mesma ([GAONAC'H, 2016](#)).

A seguir temos os possíveis impactos da inserção do carregamento de veículos elétricos como uma nova carga e uma breve explicação de cada.

### 4.1 Impactos

#### 4.1.1 Capacidade de Geração

Com o aumento da demanda na potência de ponta, tem-se a necessidade de um aumento na capacidade de potência que pode ser transmitida. Não necessariamente as centrais geradoras terão condições de atender estas novas cargas, sendo necessário um investimento para o aumento da capacidade de geração.

Estudos realizados no Reino Unido mostram que em 2050, para atender a demanda de carregamento de veículos elétricos deste ano, será necessária a instalação de novas centrais geradoras de eletricidade de até 18 GW. Isto seria o equivalente à construção de 10 usinas nucleares ([ENERGY-WORLD, 2017](#)).

Porém, como o propósito dos veículos elétricos é de buscar o meio de transporte mais sustentável possível, a tendência é que o aumento de demanda na carga para o

carregamento destes veículos seja alinhado com o aumento de unidades consumidoras com geração distribuída. Assim, a fonte de energia utilizada para atender estas novas demandas seria proveniente de fontes renováveis, sendo elas solar fotovoltaica e eólica (MIT, 2011).

#### 4.1.2 Impacto no Nível de Tensão e Corrente

Para o carregamento de veículos elétricos é necessário um aumento da corrente transmitida, ocasionando uma queda de tensão. Estas variações possuem sua magnitude alterando-se de acordo com a carga, ou seja, de acordo com a quantidade de veículos elétricos a serem conectados à rede. É importante observar se a variação de tensão ultrapassará os limites estabelecidos no PRODIST.

#### 4.1.3 Impacto nos Condutores e Transformadores

Como visto na seção acima, o carregamento de veículos elétricos exige um aumento na corrente transmitida, conseqüentemente, é necessário que os condutores do sistema possuam características que permitam a circulação destas correntes acima daquelas para qual foram inicialmente projetados, estando relacionado com perdas por efeito Joule. Outro possível impacto está na variação da tensão podendo prejudicar equipamentos como transformadores reduzindo expressivamente sua vida útil de utilização (GAONAC'H, 2016).

### 4.2 Soluções

Com todos estes possíveis impactos, algumas soluções encontradas na literatura podem ser utilizadas para mitigá-los, sendo necessário um estudo para se identificar a viabilidade e a probabilidade de sucesso da escolha. A seguir temos as possíveis soluções:

- Utilização de tarifas sazonais, instigando os proprietários a carregar seus veículos fora do horário de pico, deslocando a demanda de potência ao longo do dia, evitando assim um possível gasto com reestruturação do sistema.
- Investir em reforços de infraestrutura do sistema de distribuição, sendo função da concessionária distribuidora local a realização desta reforma.
- Utilização de um sistema interligado inteligente controlando o carregamento dos veículos elétricos de acordo com a capacidade de geração momentânea.

Este último item é algo que tem sido bastante pesquisado e desenvolvido nos últimos anos e se apresenta como uma tendência para o futuro das redes de distribuição de energia elétrica. Trata-se de um sistema de distribuição de energia elétrica inteligente contendo

muitas unidades de geração distribuída. Esta rede inteligente será capaz de controlar o carregamento dos veículos elétricos de acordo com a capacidade de geração instantânea, fazendo com que os veículos sejam carregados enquanto a geração for maior do que a demanda. No caso em que a demanda for maior que a geração, a energia armazenada na bateria dos veículos poderá ser utilizada para suprir esta demanda, fazendo com que os veículos se conectem à rede fornecendo energia para ela. Este sistema é chamado de *Smart Grid* (MIT, 2011).

# 5 Metodologia

## 5.1 Sistemas Elétricos

Os sistemas elétricos de potência tem como principal objetivo levar energia elétrica do local de geração até o consumidor final, seguindo os seguintes passos: geração, transmissão, distribuição e consumo. No primeiro processo, de geração, é onde ocorre a conversão de alguma forma de energia em energia elétrica, no segundo processo temos a transmissão, que realiza o transporte desta energia, geralmente em distâncias consideráveis, do local de geração até os centros de distribuição. No terceiro processo, a energia elétrica é então distribuída em distâncias menores às presentes na transmissão para os consumidores finais (SIMON, 2013).

Os sistemas de distribuição em sua grande parte são constituídos de subestações que são alimentadas por uma ou mais linhas de transmissão. Cada estação de distribuição apresenta suas particularidades, fator que depende de algumas variáveis como a quantidade de consumidores locais e proximidade com pontos de geração. Portanto, sua disposição irá depender da concessionária distribuidora e das condições locais. Cada estação de distribuição pode alimentar um ou mais alimentadores primários, que são predominantemente radiais. Logo, só existe um caminho para o fluxo de energia da sub-estação até o consumidor final. No Brasil temos que a distribuição de energia elétrica é realizada por 67 companhias distribuidoras, sendo que todas estão submetidas à regulamentação da Aneel. A função da ANEEL é de garantir que a entrega de energia elétrica seja feita ao consumidor final seguindo os padrões de confiabilidade, segurança, qualidade, disponibilidade e custos, garantindo o máximo de segurança e o mínimo de impacto ambiental (ANEEL, 2017).

O funcionamento de um sistema elétrico de potência envolve uma série de requisitos que devem ser seguidos para sua operação, tais como atendimento à padrões de qualidade, continuidade de fornecimento, atendendo às cargas sem alguma falha no equilíbrio entre geração e consumo e por último a economia do processo, otimizando os custos de geração da energia elétrica.

De acordo com o módulo 2 do PRODIST, temos que as cargas conectadas ao sistema de distribuição podem ser classificadas em 3 níveis: SDBT (Sistema de Distribuição de Baixa Tensão), SDMT (Sistema de Distribuição de Média Tensão) e SDAT (Sistema de Distribuição de Alta Tensão). Esta classificação depende da tensão a qual a carga é atendida e elas são estratificadas da maneira como pode ser vista na tabela abaixo:

Com o objetivo de se analisar o impacto do carregamento residencial de veículos

Classificação	Nível de Tensão
SDBT	Até 1 kV
SDMT	De 1 kV a 44 kV
SDAT	Acima de 44 kV

Tabela 1 – Classificação Sistemas de Distribuição

elétricos, para este trabalho serão levados em consideração os sistemas de distribuição de baixa tensão, que são aqueles utilizados para atender as cargas residenciais.

## 5.2 Fluxo de Potência

Nos estudos e análises de sistemas de energia elétrica, um método muito utilizado para se determinar a tensão e a potência nos barramentos de um sistema elétrico é o cálculo do fluxo de potência. O fluxo de potência, ou também conhecido como fluxo de carga, tem como objetivo auxiliar nos estudos para projetar, planejar, estabelecer e operar sistemas elétricos, garantindo a transferência de energia elétrica em uma rede estável e confiável.

Sua utilização incrementa a efetividade de operação de sistemas de distribuição, pois permite diagnosticar o comportamento da rede, como identificar o perfil de de tensão da rede, mensurar as perdas de energia e identificar a capacidade dos condutores e transformadores da rede (SALGADO, 2015).

Por meio da utilização de equações algébricas é possível realizar a análise do fluxo de potência verificando o estado da rede atuando em regime permanente, identificando possíveis sobrecargas em equipamentos do sistema e a presença de níveis de tensão fora dos limites operacionais.

O cálculo para a determinação do fluxo de potência é feito basicamente como considerando o alimentador como um grande circuito elétrico, onde as tensões em todas as barras são determinadas, feito isso em seguida são calculados os fluxos de potência em cada componente do sistema.

Existem várias metodologias e modelos desenvolvidos para o cálculo do fluxo de potência, assim como existem muitos softwares para a realização destes cálculos, que são muito utilizados devido à facilidade de utilização, alta precisão e disponibilidade de dados.

Para este trabalho foi escolhido um software capaz de realizar o cálculo do fluxo de potência de uma rede complexa. O software é capaz de resolver iterativamente as equações não lineares da rede, e para isto se é utilizado o método Newton-Raphson.



### 5.2.1 Fluxo de Potência pelo Método Newton-Raphson

De forma básica o fluxo de potência é uma representação da rede elétrica em que as linhas do sistema são representadas por um circuito equivalente, em que as cargas a serem consumidas e as unidades geradoras são inseridas na rede com sua respectiva corrente equivalente. Essas novas correntes ao serem inseridas no sistema acabam por gerar equações não lineares no sistema (SALGADO, 2015).

De maneira geral, caracterizando um circuito de um sistema elétrico em sistema equivalente pi temos a seguinte representação, considerando um sistema com duas barras conectadas, sendo elas a barra  $i$  e a barra  $j$  com a impedância série da linha representada por  $Z$ :

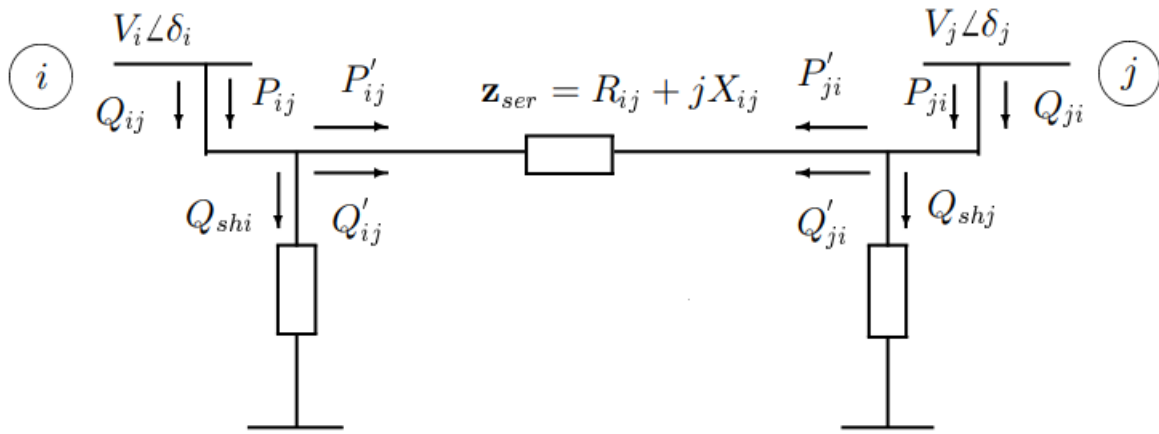


Figura 7 – Circuito Pi Equivalente

Em que  $V_i$  é a tensão na barra  $i$ ,  $Q_{ij}$  é o fluxo de potência reativo e  $P_{ij}$  o fluxo de potência ativo. O termo  $Q_{ij}$  é a potência aparente que flui do ramo *shunt*. De maneira análoga temos os mesmos termos para os fluxos de potência na barra  $j$ .

Os fluxos de potência entre as barras podem ser expressos como:

$$P_{ij} = \frac{1}{R_{ij}^2 + X_{ij}^2} (R_{ij} V_i^2 - R_{ij} V_i V_j \cos \delta_{ij} + X_{ij} V_i V_j \sin \delta_{ij})$$

$$Q_{ij} = -\frac{V_i^2 B_c}{2} + \frac{1}{R_{ij}^2 + X_{ij}^2} (X_{ij} V_i^2 - X_{ij} V_i V_j \cos \delta_{ij} - R_{ij} V_i V_j \sin \delta_{ij})$$

Figura 8 – Fluxos de Potência

Realizando manipulações matemáticas e definindo a condutância e a susceptância séries da linha, onde  $g$  é a condutância e  $b$  a susceptância temos:

$$g_{ij} = \frac{R_{ij}}{R_{ij}^2 + X_{ij}^2}$$

$$b_{ij} = \frac{-X_{ij}}{R_{ij}^2 + X_{ij}^2}$$

Figura 9 – Condutância e Susceptância

Temos que os fluxos de potência ativa da barra  $i$  para a barra  $j$ ,  $P_{ij}$  e o fluxo de potência ativa da barra  $j$  para a barra  $i$ ,  $P_{ji}$  são dados por:

$$P_{ij} = g_{ij}V_i^2 - g_{ij}V_iV_j\cos\delta_{ij} - b_{ij}V_iV_j\sin\delta_{ij}$$

$$P_{ji} = g_{ij}V_j^2 - g_{ij}V_iV_j\cos\delta_{ij} + b_{ij}V_iV_j\sin\delta_{ij}$$

Figura 10 – Fluxos de Potência Ativa

E os fluxos de potência reativa, de forma análoga são dados da seguinte forma, onde  $B$  é a susceptância da linha:  $j$  para a barra  $i$ ,  $P_{ji}$  são dados por:

$$Q_{ij} = -V_i^2\frac{B_c}{2} + (-b_{ij}V_i^2 + b_{ij}V_iV_j\cos\delta_{ij} - g_{ij}V_iV_j\sin\delta_{ij})$$

$$Q_{ji} = -V_j^2\frac{B_c}{2} + (-b_{ij}V_j^2 + b_{ij}V_iV_j\cos\delta_{ji} + g_{ij}V_iV_j\sin\delta_{ij})$$

Figura 11 – Fluxos de Potência Reativa

Com as equações vistas acima é possível chegar a definição da expressão que determina qual o fasor corrente entre as barras, que é dado por:

$$\mathbf{I}_{ij} = \frac{\mathbf{V}_i - \mathbf{V}_j}{R_{ij} + jX_{ij}}$$

Figura 12 – Fasor Corrente

Estas equações foram desenvolvidas com base em um circuito simples. Para o cálculo de sistemas complexos, como o caso deste trabalho, são utilizados métodos numéricos computacionais para encontrar a solução. Sendo este o *Newton-Rhapson*.

O método *Newton-Rhapson* é um método numérico que é baseado num processo de iterações para encontrar raízes de funções. Essas iterações são feitas traçando tangentes às curvas das funções de forma que na próxima iteração a próxima aproximação é dada pela interseção da reta tangente com o eixo da função (MIRANDA et al., 2006).

### 5.3 Curva de Carga

Tem-se que a frequência diária de utilização de energia elétrica depende de fatores socioeconômicos e culturais, variando de acordo com a classe de consumidor, mas pode ser discretizada em 3 grandes grupos: residencial, comercial e industrial. Cada um apresentando um comportamento típico de utilização de carga (SIMON, 2013).

De acordo com a ANEEL, as concessionárias devem identificar o comportamento da carga de suas unidades consumidoras por meio de campanhas de medição, que deve ser realizada a cada dois ciclos de revisão tarifária, com pesquisa de pose de equipamentos e hábitos de consumo. Estas campanhas de medição tem como objetivo identificar melhor a demanda de energia por parte dos consumidores para fins de melhor planejamento e operação da concessionária. (ANEEL, 2017)

A ANEEL estabelece que a concessionária deve separar seus consumidores em grupos que variam de acordo com o nível de tensão, a potência demandada, as atividades econômicas do consumidor e por último o consumo de energia.

Com relação ao nível de tensão, temos que as unidades consumidoras podem ser divididas naquelas conectadas à sistemas de distribuição de média tensão e naquelas conectadas à sistemas de distribuição de baixa tensão. Para este trabalho estaremos trabalhando com unidades atendidas por sistemas de baixa tensão (CEB, 2019).

Dentro das unidades de baixa tensão temos uma nova segmentação de acordo com a atividade econômica do consumidor final, sendo esta segmentação feita nas classes:

- B1 - Residencial.
- B2 - Cooperativa de Eletriicação Rural.
- B3 - Industrial.
- B3 - Comercial.
- B4 - Iluminação Pública.

Com o objetivo de analisar o impacto do carregamento residencial de veículos elétricos na rede, para este trabalho será utilizado como referência cargas residenciais. Em se tratando de cargas residências, temos mais uma estratificação de perfil de consumidor,

desta vez de acordo com o consumo médio mensal do último ano do consumidor, podendo ser classificado em consumidor residencial e consumidor residencial de baixa renda.

Em Brasília, com relação aos consumidores residenciais B1, a CEB possui 12 valores diferentes de tarifa a serem cobradas dos consumidores, variando de acordo com a renda e a faixa de consumo do proprietário. Sendo o valor mais baixo de 0,1963449 R\$/kWh, para consumidores de baixa renda de até 30 kWh, e o valor mais caro de 0,7548647 R\$/kWh, para os consumidores acima de 500kWh (CEB, 2019). As tarifas e os respectivos perfis de consumidor podem ser vistas na tabela abaixo:

Baixa Renda ou Normal	Consumo	R\$/kWh
Baixa Renda	Até 30kWh	0,1963449
Baixa Renda	De 31kWh a 100kWh	0,3365913
Baixa Renda	De 101 a 200kWh	0,5048869
Baixa Renda	De 201 a 220kWh	0,5439195
Baixa Renda	De 221 a 300kWh	0,6043551
Baixa Renda	De 301 a 500kWh	0,6286556
Baixa Renda	Acima de 500kWh	0,6642685
Normal	Até 50kWh	0,5574835
Normal	De 51 a 200kWh	0,6374955
Normal	De 201 a 300 kWh	0,6867800
Normal	De 301 a 500kWh	0,7143948
Normal	Acima de 500kWh	0,7548647

Tabela 2 – Tarifas Residenciais - CEB

Como o veículo elétrico é ainda algo recente no Brasil, e se trata de produto relativamente mais caro do que os outros no mercado, vamos considerar para este trabalho que os primeiros proprietários de veículos elétricos se encaixam no perfil de consumidor residencial acima de 500kWh.

A partir da utilização de veículos elétricos por parte da população, uma nova carga será conectada à rede elétrica, gerando uma nova demanda energética passando pelas redes elétricas, podendo ser necessária uma reestruturação da rede a fim de atender à nova demanda.

# 6 OpenDSS

## 6.1 Introdução

O OpenDSS será o software utilizado para a realização das simulações neste trabalho. Trata-se de um software livre, desenvolvido em 1997 pela EPRI e que pode ser encontrado facilmente para download na internet. É um programa concebido para a modelagem e simulação de redes de distribuição de energia elétrica (EPRI, 2009).

O software é capaz de realizar a análise em regime resolvendo fluxo de potências harmônicas na rede e encontrando soluções fasoriais, exceto transientes eletromagnéticos, sendo capaz de resolver redes radiais e malhadas. Sendo assim capaz de analisar a estabilidade, proteção e qualidade da inserção de novas cargas em uma rede, como é o caso de estudo deste trabalho.

Para a modelagem da rede de distribuição a ser simulada é necessário fornecer ao software os parâmetros da rede. A partir desta definição que é realizada como uma entrada de dados no programa, o software será capaz de identificar os elementos da rede e simular as diferentes configurações da mesma.

## 6.2 Parâmetros

Nesta seção entenderemos quais são os parâmetros de entrada que devem ser realizados no programa para a modelagem do sistema a partir dos elementos a seguir, com alguns exemplos. Todos os elementos citados a seguir são implementados no programa a partir do comando *New*. e o nome do elemento, em seguida são dadas as suas propriedades.

### 6.2.1 Circuito

O elemento circuito deve ser o primeiro elemento a ser declarado no software, representando um sistema linear com uma fonte de tensão em série com uma impedância, determinando o equivalente de Thévenin. Os dados de entrada no software devem conter o número de fases, a tensão de base, a identificação do barramento e outras propriedades também podem ser declaradas, como as potências de curto ou impedâncias da rede.

A seguir temos um exemplo de um circuito a ser implementado no programa, conectado à uma barra identificada como barra1, por meio da função *bus*, com uma tensão de base de 13,8 kV, trifásico com uma potência de curto trifásico de 500 MVA e a de curto monofásico de 400 MVA.

A entrada deste circuito no programa ficaria da seguinte forma:

```
New Circuit.CircuitoExemplo bus1=barra1 basekv=13.8 phases=3 mvasc3=500
mvasc1=400
```

## 6.2.2 Linha

No OpenDSS podemos implementar linhas monofásicas, bifásicas e trifásicas. O software utiliza o modelo pi para representação das linhas, como entrada deve-se determinar o número de fases, a frequência e a unidade de medida de distância que será utilizada. Deve-se determinar as matrizes de impedâncias próprias e mútuas além de se determinar a matriz de capacitância nodal. Assim, o software fará a manipulação das matrizes obtendo a matriz de admitância nodal do sistema para a realização dos cálculos.

Além disso, para se determinar as divisões das linhas é necessário identificar os pontos inicial e final de conexão, o tamanho da seção de linha escolhida. Para o caso de muitas linhas que possuem as mesmas características elétricas, existe uma função chamada *linecode* que pode armazenar as informações das matrizes citadas acima e depois basta associar as linhas com esta função, facilitando a entrada de parâmetros no programa. Outra função interessante é a *Wiredata*, que armazena as características de cada tipo de condutor, prático para sistemas com linhas compostas por diferentes condutores (EPRI, 2009).

Um exemplo de linha a ser implementado no programa pode ser visto a seguir. Neste caso trata-se de uma linha equilibrada, trifásica, com o primeiro terminal conectado à barra identificada como barra1 e o segundo terminal conectado à uma barra identificada como barra2. A linha possui um tamanho de 1 km, característica introduzida pelo comando *length*, com os parâmetros elétricos de sequência positiva e zero definidos pela biblioteca do programa. Sua implementação pode ser feita da seguinte maneira:

```
New Line.Linha phases=3 bus1=barra1 bus2=barra2 length=1 units=km
r1=0.06 x1=0.12 r0=0.18 x0=0.40 !ohm/km
c1=3 c0=1 !nF/km
```

## 6.2.3 Carga

O elemento carga é o parâmetro principal de estudo para este trabalho. O carregamento de veículos elétricos irá afetar diretamente as propriedades deste elemento. Para se determinar a carga é necessário indentificar o número de fases, a linha com a qual está conectada, a potência e o fator de potência, a tensão aplicada à carga e o tipo de conexão. Além disso, temos que o software é capaz de identificar 8 modelos de carga como modelo de potência constante, modelo de corrente constant e modelo de impedância constante.

Existe a função *LoadShape* que é utilizada para a plotagem da curva de carga do sistema proposto. Neste função deve-se dar como entrada no programa a quantidade de pontos na curva de carga e o intervalo de tempo entre estes pontos.

Considerando uma carga trifásica, caracterizada pelo modelo 1 do OpenDSS, conectada a uma barra identificada como barra1, com uma tensão de 13.8 kV, com potência ativa de 10 kW e potência reativa de 3 kVAr, conectada em estrela, temos que esta carga poderá ser implementada no programa da seguinte forma:

```
New Load.Carga phases=3 model=1 bus=barra1 kv=13.8 kw=10 kvar=3 conn=wye
```

#### 6.2.4 Transformador

O elemento transformador é outro componente de um sistema elétrico muito importante a ser caracterizado no software por ser responsável por adequar os níveis de tensão desejados. No OpenDSS podemos representar transformadores monofásicos, trifásicos e de fase dividida.

Para representar um transformador no programa, pode-se dar como entrada no programa várias propriedades dos transformadores, mas principalmente reatância, porcentagem de perda em carga e perda em vazio, corrente de magnetização e as propriedades dos enrolamentos, contendo informações como o local de conexão na barra, número de fases, a tensão nominal, a potência do transformador e o tipo de conexão.

Considerando um transformador trifásico, de dois enrolamentos, com reatância de 5%, implementada pelo comando "xhl", com uma perda de potência de 1% da potência nominal, a perda em vazio sendo de 0,5% com uma corrente de magnetização de 1%. O comando para caracterizar a perda de potência nominal é "%loadloss" e o comando para caracterizar a perda em vazio é "%noloadloss". Considerando o primeiro enrolamento sendo identificado como 1, conectado a uma barra identificada como barra1 e com tensão nominal de 13,8 kV com potência de 15 kVA conectado em estrela. Considerando o segundo enrolamento sendo identificado como 2, conectado a uma barra identificada como barra2, com tensão nominal de 220 V, potência de 15 kVA conectado em estrela. Este transformador será implementado no programa da seguinte maneira:

```
New Transformer.Transformador xhl=5 windings=2 %loadloss=1 %noloadloss=0.5
%imag=1
```

```
wdg=1 bus=barra1 kv=13.8 kva=15 conn=wye
```

```
wdg=2 bus=barra2 kv=0.220 kva=15 conn=wye
```

## 6.3 Exemplos Práticos

Aqui temos alguns exemplos de simulações realizadas no OpenDSS com as funções que serão utilizadas para a futura análise do trabalho. Como curva de carga, cálculo de tensão e corrente.

Primeiramente, temos um exemplo simples de um sistema trifásico, com tensão de 13,8 kV, frequência de 60 Hz, onde temos uma carga trifásica em estrela conectada ao meio de uma linha. Temos os valores de demanda de carga variando ao longo do período de um dia. Abaixo segue o código a ser compilado no programa:

```

Clear

New Circuit.Exemplo phases=3 basekv=13.8 bus1=A

New LineCode.Exemplo nphases=3 basefreq=60 units=km

  Rmatrix=[0.19 0.06 0.19 0.06 0.06 0.19] !ohm/km
  Xmatrix=[0.86 0.49 0.86 0.44 0.49 0.86] !ohm/km
  Cmatrix=[9.34 -2.21 9.93 -0.99 -2.24 9.27] !nF/km

New Line.Linha1 phases=3 Bus1=A Bus2=B Length=0.4 units=km linecode=Exemplo
New Line.Linha2 phases=3 Bus1=B Bus2=C Length=0.2 units=km linecode=Exemplo

New LoadShape.Dia npts=24 interval=1

  mult=(0.8 0.78 0.75 0.74 0.73 0.75 0.78 0.79 0.81 0.82 0.83 0.84 0.84 0.85 0.86
0.88 0.9 0.93 0.98 1 0.99 0.97 0.93 0.83)

New Load.Carga phases=3 conn=weye Bus1=B kw=25 pf=0.92 kv=13.8

Set voltagebases = [13.8]

calcVoltagebases

```

Após o programa ser compilado, temos que se torna possível realizar a plotagem da curva de carga no dia. Utilizando a função *LoadShape*. A partir da análise deste exemplo, torna-se possível identificar a característica diária da demanda de carga no horário de pico, com o consumo se elevando bruscamente a partir das 16h. Chegando ao pico de 1 p.u. no horário de 19h, como visto na figura da página abaixo.

Este trabalho será realizado sobre um caso de um alimentador real que será cedido pela CEB. Para ilustrar como a simulação será realizada, temos um caso de um alimentador rural, também cedido pela CEB, que será explicado abaixo.

A caracterização de um circuito alimentador no software exige muitas informações, pois se trata de um circuito complexo, com muitas unidades consumidoras, no caso cargas, transformadores, chaves, medidores e condutores. Portanto, nestes casos para não ser



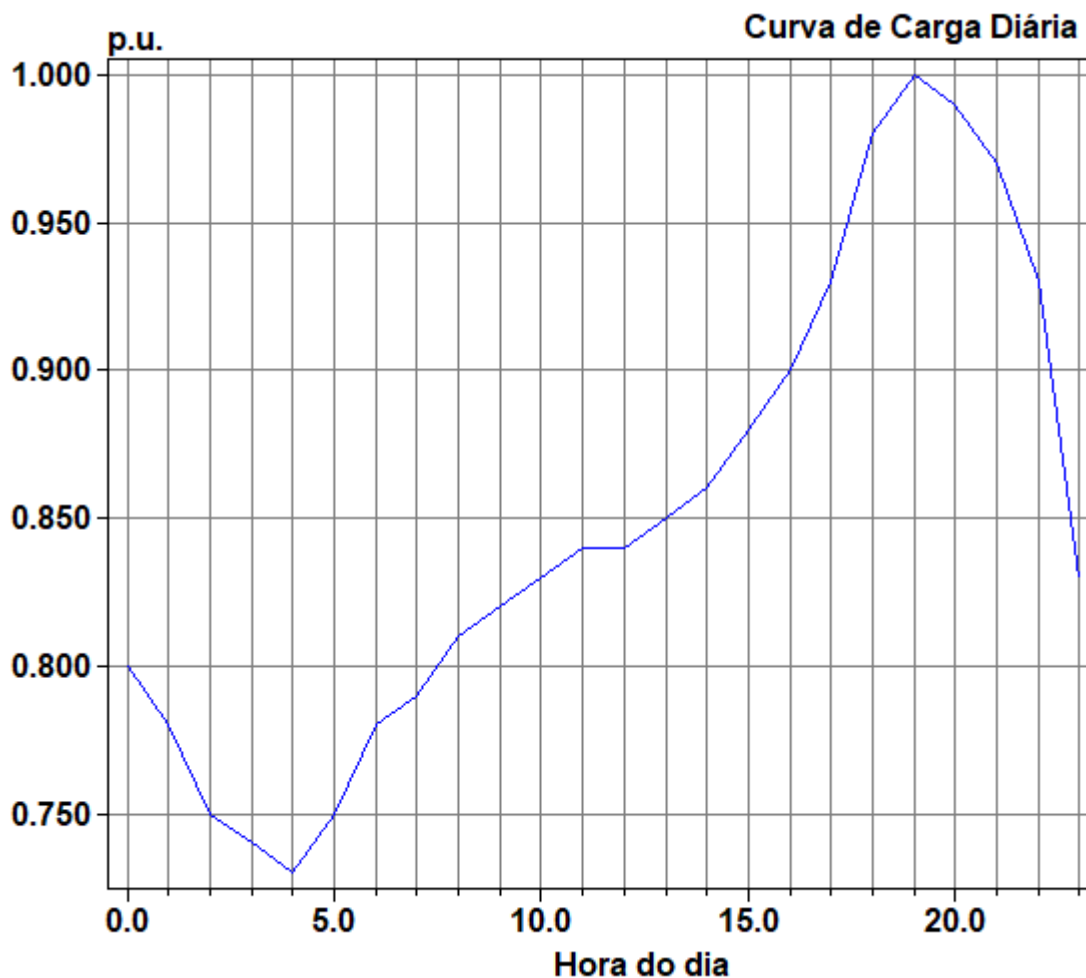


Figura 13 – Curva de Carga Diária

necessário caracterizar todos os dados do circuito no software de uma só vez, cada variável é caracterizada em arquivos diferentes e no final, todas são compiladas em um mesmo arquivo chamado *master*.

Sendo assim, as cargas são definidas em arquivos chamados de "Cargas", onde em cada arquivo é caracterizada a carga como o modelo de carga, número de fases, tipo de conexão e potência. O circuito é definido em um arquivo chamado "Circuito", identificando características como tensão base e reatância. Os condutores são caracterizados em um arquivo chamado "CodConductor", onde se caracteriza os pontos de conexão dos baramentos, número de fases e características das linhas. As demandas de carga são caracterizadas em arquivos chamados "Curvacarga", onde se caracteriza a demanda de potência de uma unidade consumidora em um dia, sendo medida em intervalos de uma hora. Os medidores e chaves utilizados no sistema são caracterizados em arquivos chamados "Medidores" e "Chaves" respectivamente, onde se determinam o local que eles se encontrarão no sistema. As linhas são caracterizadas em arquivos chamados "Ramais" e "Segmentos", onde se indentificam o número de fases, pontos de conexão e dimensões das linhas. As tensões de base do

sistema são caracterizadas em arquivos chamados "Tensoesbase", onde se identificam os valores de tensão e o local do circuito em que se encontram. Por último os transformadores são caracterizados em arquivos chamados "Transformador", onde se identificam o ponto de conexão no sistema, o número de fases e propriedades dos transformadores.

Após a programação de todos estes arquivos, um arquivo chamado "Master" é criado. Neste arquivo todas as características discretizadas acima são chamadas no programa por meio do comando *Redirect*. Com isso, torna-se possível simular o circuito alimentador e obter resultados do cálculo do fluxo de potência.

O código do arquivo "Master" pode ser compilado da seguinte maneira:

```

Clear
Redirect 'CircuitoMT5160VA07NTMBSR1PVT --.dss'
Redirect 'CodCondutor5160VA07NTMBSR1PVT --.dss'
Redirect 'CurvacargaMT5160VA07NTMBSR1PVT --.dss'
Redirect 'CurvacargaBT5160VA07NTMBSR1PVT --.dss'
Redirect 'ChavesMT5160VA07NTMBSR1PVT --.dss'
Redirect 'SegmentosMT5160VA07NTMBSR1PVT --.dss'
Redirect 'ReguladorMT5160VA07NTMBSR1PVT --.dss'
Redirect 'TransformadorMTMTMTBT5160VA07NTMBSR1PVT --.dss'
Redirect 'SegmentosBT5160VA07NTMBSR1PVT --.dss'
Redirect 'RamaisBT5160VA07NTMBSR1PVT --.dss'
Redirect 'Medidores5160VA07NTMBSR1PVT --.dss'
Redirect 'CargasMTDO015160VA07NTMBSR1PVT --.dss'
Redirect 'CargasBTDO015160VA07NTMBSR1PVT --.dss'
Redirect 'CargasMTNTDO015160VA07NTMBSR1PVT --.dss'
Redirect 'CargasBTNTDO015160VA07NTMBSR1PVT --.dss'
Redirect 'Tensoesbase5160VA07NTMBSR1PVT --.dss'

Set mode = daily
Set tolerance = 0.0001
Set maxcontroliter = 10
!Set algorithm = newton
!Solve mode = direct

```

Solve

Export meters

Após a compilação do programa, podemos obter alguns resultados importantes para a realização deste estudo. Para a obtenção destes resultados é necessário rodar o código por meio da função *Solve* do OpenDSS, que irá resolver o fluxo de potência do sistema. Após as iterações, o circuito estará resolvido e será possível analisar os resultados.

Primeiramente, para se obter as informações do sistema, como tensões mínima e máxima, potências ativas, reativas e perdas, utilizamos o comando *show* e em seguida o comando *Summary* que irá expor estas informações, como pode ser visto na imagem abaixo:

```
- Circuit Summary -  
  
Year = 0  
Hour = 120  
Max pu. voltage = 1.0161  
Min pu. voltage = 0.83109  
Total Active Power: 1.42964 MW  
Total Reactive Power: 0.61165 Mvar  
Total Active Losses: 0.124525 MW, (8.71  
%)  
Total Reactive Losses: 0.0723683 Mvar  
Frequency = 60 Hz  
Mode = Daily  
Control Mode = STATIC  
Load Model = PowerFlow
```

Figura 14 – Função *Summary*

Estas são informações do circuito alimentador como um todo, para se obter informações de cada barra do sistema utilizamos o comando *Show* e em seguida o comando *Voltages LN*. Seguindo estes comandos, o software irá emitir um arquivo *.txt* contendo as informações de tensão de cada barra, como pode ser visto na figura (15) na próxima página. Em que "V1" corresponde à tensão de sequência positiva, e "V2" e "V0" correspondem às tensões de sequência negativa e zero respectivamente.

Para se obter as magnitudes de corrente para cada elemento do sistema, utiliza-se o comando *show* e em seguida o comando *Current Elem*. Assim, o software irá emitir um arquivo *.txt* contendo as informações de corrente de cada elemento, como pode ser visto na figura (16) localizada na próxima página.

Para se obter o fluxo de potência para cada elemento do sistema utiliza-se o comando *show* e em seguida o comando *Powers kVA elem*. Após estes comandos o software também irá emitir um arquivo *.txt* contendo as informações de potência para cada trecho do sistema, como pode ser visto na figura (17), localizada na próxima página.

Barra	Mag:	V1 (kV)	p.u.	V2 (kV)	V0 (kV)
m6008744-va07		8.047	1.01	1.047E-006	0.02154
m6008744-va07-c		8.047	1.01	1.56E-005	0.02154
m6008878-va07		7.594	0.9531	0.1128	0.04643
m6008878-va07-c		7.594	0.9531	0.1128	0.04643
m6010181-va07		7.694	0.9656	0.08013	0.03826
m6010181-va07-c		7.693	0.9656	0.08014	0.03827
m6008339-va07		7.799	0.9789	0.0455	0.03183
m6008339-va07-c		7.799	0.9789	0.04551	0.03183
m6007983-va07		7.703	0.9668	0.05932	0.04247
m6007983-va07-c		7.703	0.9668	0.05932	0.04247
m6008981-va07		7.675	0.9633	0.0685	0.04763
m6008981-va07-c		7.675	0.9633	0.06851	0.04763
m6009415-va07		7.671	0.9629	0.06946	0.04818
m6009415-va07-c		7.671	0.9629	0.06946	0.04818

Figura 15 – Valores de tensão para cada elemento

Barra	Fase	Magnitude, A	Ângulo
M6008744-VA07	1	68.817 /_	161.4 =
M6008744-VA07	2	73.888 /_	30.6 =
M6008744-VA07	3	51.261 /_	-80.4 =

Figura 16 – Valores de corrente elétrica para cada elemento

Barra	Fase	kW	+j	kvar	kVA	Fator de Potência
M6008744-VA07	1	-523.7	+j	-177.4	552.9	0.9471
M6008744-VA07	2	-518.3	+j	-289.9	593.9	0.8727
M6008744-VA07	3	-387.6	+j	-144.3	413.6	0.9372

Figura 17 – Fluxo de potência para cada trecho do sistema

Utilizando a função LoadShape conseguimos plotar a curva de carga diária de qualquer unidade consumidora deste circuito alimentador, bastando apenas identificá-la no programa, no caso, foi identificada a unidade consumidora "AS-TIPO1\_DO". Como se trata de uma curva de carga de um alimentador rural, temos que o pico desta é diferente do pico característico de curvas de carga residenciais, tendo seu pico por volta de 11h, como pode ser visto na imagem abaixo:

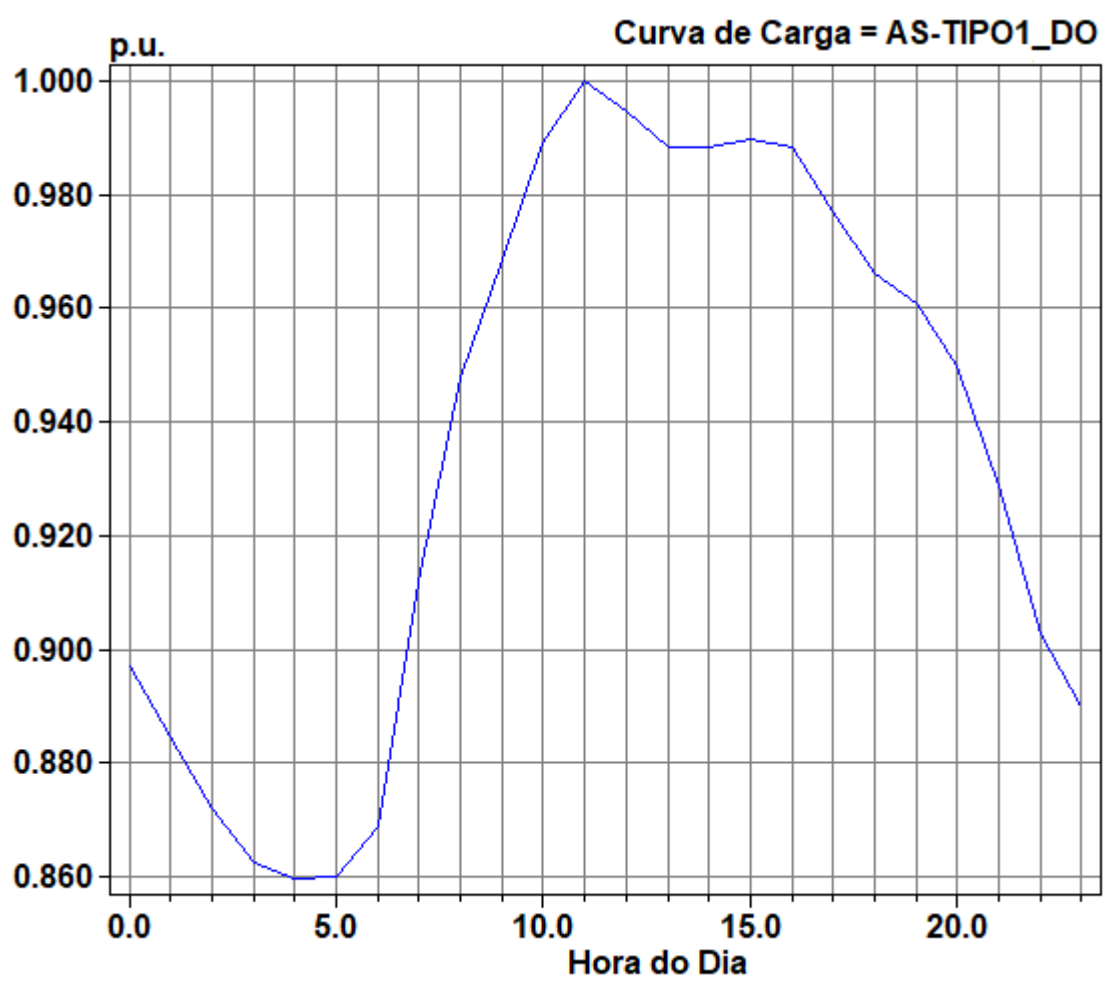


Figura 18 – Curva de Carga Diária Alimentador Rural

# 7 Resultados

## 7.1 Estudo de Caso

Para a realização do estudo de caso deste trabalho foram realizadas simulações no software OpenDSS com dados de um alimentador urbano que atende residências do bairro do Jardim Botânico de Brasília-DF. Os dados deste alimentador foram obtidos pela CEB, sendo este indicado com o nome de Alimentador 1004.

Como visto no capítulo anterior, o OpenDSS é um software que é capaz de discretizar um sistema elétrico de potência complexo para a realização de simulações computacionais, cada elemento do sistema é modelado no software por meio da entrada de parâmetros.

No caso do alimentador em análise, os parâmetros inseridos no software são as características físicas do circuito do sistema (distância entre os barramentos, características de condutância, posição de chaves, medidores e ramais), características de operação do sistema como tensões de base e também o comportamento das cargas do sistema. As simulações realizadas neste trabalho serão com base na alteração destas cargas no software, para se analisar qual o impacto da rede caso uma nova carga seja inserida no sistema, no caso, o carregamento de veículos elétricos.

Pegando de exemplo uma carga presente nos parâmetros de carga do alimentador, temos que a carga é representada no software da seguinte maneira:

```
New "Load.BT_101881_M1"bus1="B17438925710449-1-TR0494_112T.1.2.3.0"
  phases=3 conn=Delta model=2 kv=0.38 kw=0.7 pf=0.92
  vmaxpu=1.5 vminpu=0.92
```

Em que *bus1* indica a qual barramento do sistema ela está conectada, *phases* indica o número de fases, *conn* indica o tipo de conexão, *kv* a tensão recebida pela carga, *kw* a potência média diária pela qual ela é atendida, *pf* o fator de potência e *vmaxpu* e *vminpu* as tensões mínimas e máximas por unidade.

O arquivo *master*, que é o arquivo geral que aglomera todos os arquivos de parâmetros é descrito da seguinte forma:

```
! Criação da seção do arquivo master
Clear
Redirect 'CircuitoMT51601004NTMBSR1PVT --.dss'
```

```

Redirect 'CodCondutor51601004NTMBSR1PVT - -.dss'
Redirect 'CurvacargaMT51601004NTMBSR1PVT - -.dss'
Redirect 'CurvacargaBT51601004NTMBSR1PVT - -.dss'
Redirect 'ChavesMT51601004NTMBSR1PVT - -.dss'
Redirect 'SegmentosMT51601004NTMBSR1PVT - -.dss'
Redirect 'ReguladorMT51601004NTMBSR1PVT - -.dss'
Redirect 'TransformadorMTMTMTBT51601004NTMBSR1PVT - -.dss'
Redirect 'SegmentosBT51601004NTMBSR1PVT - -.dss'
Redirect 'RamaisBT51601004NTMBSR1PVT - -.dss'
Redirect 'Medidores51601004NTMBSR1PVT - -.dss'
Redirect 'CargasMTDO0151601004NTMBSR1PVT - -.dss'
Redirect 'CargasBTDO0151601004NTMBSR1PVT - -.dss'
Redirect 'CargasMTNTDO0151601004NTMBSR1PVT - -.dss'
Redirect 'CargasBTNTDO0151601004NTMBSR1PVT - -.dss'
Redirect 'Tensoesbase51601004NTMBSR1PVT - -.dss'

Set mode = daily
Set tolerance = 0.0001
Set maxcontroliter = 10
Set algorithm = newton
!Solve mode = direct
Solve
Export meters

```

A partir do arquivo *master* podemos ver que a resolução do software é utilizando o método *Newton-Rhapson*, como pode ser visto em *Set algorithm = newton*.

Desta forma, temos a carga "Load.BT\_101881\_M1 está conectada no barramento B17438925710449-1-TR0494\_112T.1.2.3.0, é uma carga trifásica conectada em Delta, possui uma tensão de linha de 380 V, uma potência média de 0.7kW com um fator de potência de 0.92 e suas tensões máximas e mínimas por unidade são 1.5 e 0.92 pu respectivamente.

De maneira geral, todas as cargas do alimentador possuem esta configuração, apenas algumas mudanças ocorrem com relação ao tipo de conexão e a potência média atendida. Algumas cargas estão zeradas, o que indica que os respectivos barramentos não estão conectados à nenhuma carga.

Utilizando como base de estudo estas cargas que possuem as mesmas propriedades, temos que a potência média delas é de 0,7kW. Portanto, considerando em um mês com 30 dias, temos que esta potência média atuando ao longo deste período será o equivalente à 504 kWh de consumo de energia. Este perfil de consumidor se encaixa naqueles que possuem a tarifa mais cara a ser cobrada pela CEB.

Portanto, para este estudo de caso vamos considerar que o consumidor da concessionária de energia se enquadra no perfil normal acima de 500 kWh por mês. Logo, a tarifa a ser cobrada pela CEB será de 0,7548647 R\$/kWh, totalizando uma conta mensal de aproximadamente R\$ 380,45, sem levar em consideração os adicionais como taxa de iluminação pública entre outros (CEB, 2019).

Logo, temos que o consumidor usado de referência para este trabalho possui a tarifa mais cara a ser cobrada pela CEB, e caso seja um proprietário de veículos elétricos o carregamento de seu veículo será uma nova carga que representará uma parcela considerável em sua conta de energia.

### 7.1.1 Comportamento do Proprietário

Considerando que a região onde o alimentador utilizado para a realização deste trabalho está situada à aproximadamente 18 km do centro de Brasília, e considerando que os residente das cargas alimentadas por este alimentador trabalham, estudam ou realizam atividades diárias no centro de Brasília, podemos considerar que cada proprietário de veículo elétrico percorrerá uma distância média de aproximadamente 40 km diários. Para além, podemos estipular que aos finais de semana (sábados e domingos), esta distância será de aproximadamente 15 km percorridos diariamente como pode ser visto na imagem na página a seguir (MAPS, 2019).

Considerando então um mês com 30 dias, sendo 21 dias úteis e 9 dias durante os finais de semana, temos que a distância média a ser percorrida pelo proprietário em um mês será de aproximadamente 975 km.

O cálculo da quantidades de vezes que serão necessárias o carregamento do veículo ao longo de um mês vai depender da autonomia do veículo a ser comprado pelo proprietário. Atualmente são poucas as opções de compra de veículos elétricos no Brasil, mas em sua maioria, os veículos dispõem de uma autonomia de 300 km. Considerando então a autonomia vista anteriormente, temos que para o proprietário do veículo rodar 975 km por mês ele precisará realizar 3,25 carregamentos por mês para garantir esta autonomia. Para fins práticos e considerando que os proprietário nunca deixarão a carga da bateria de seu veículo zerar, podemos considerar que mensalmente serão realizados 4 carregamentos completos do veículo elétrico na residência do proprietário.

A potência do carregador a ser utilizado pelo proprietário do veículo dependerá



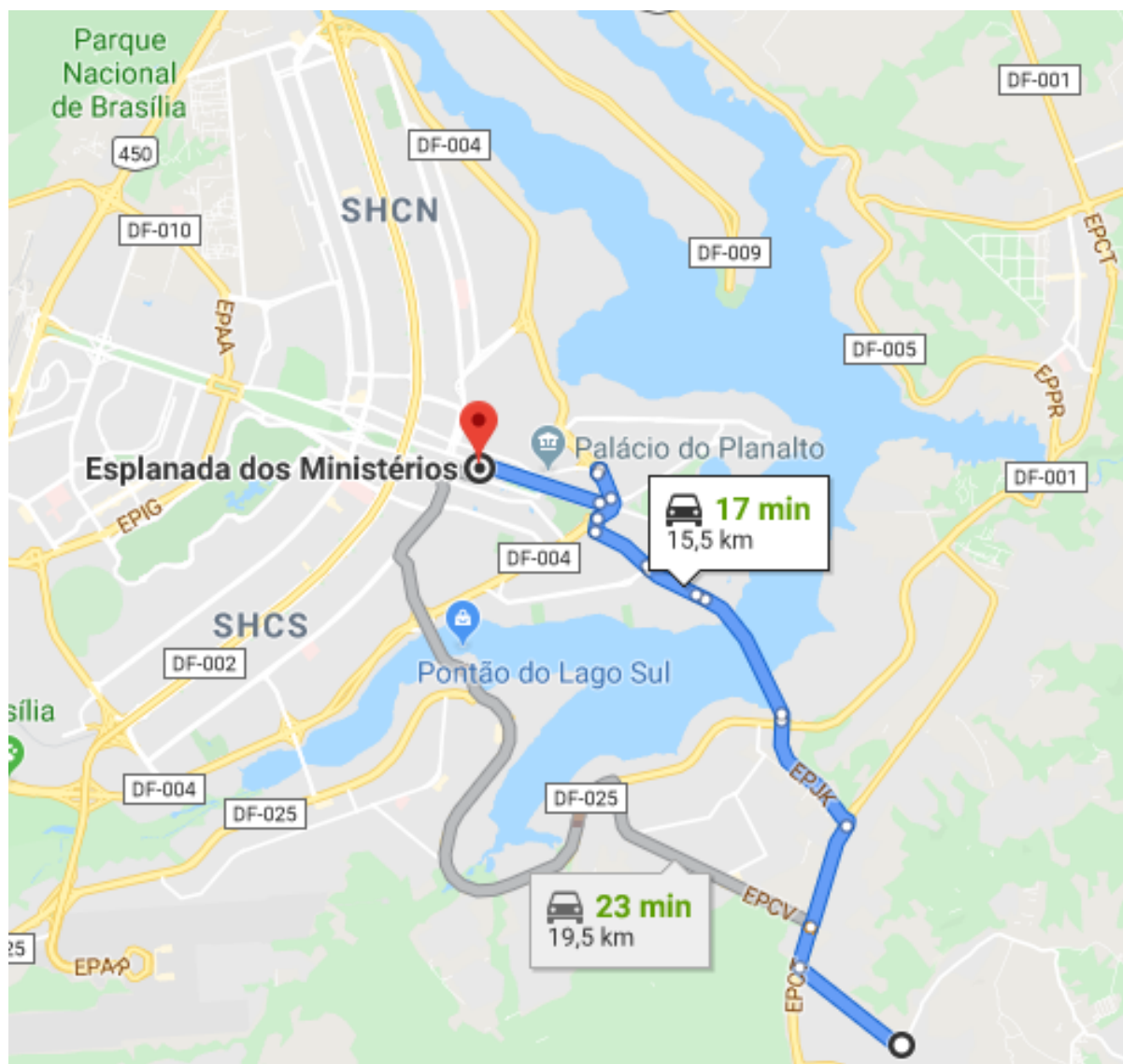


Figura 19 – Características da Rede - Caso Normal

da escolha do proprietário, quanto mais potente o carregador, mais rápida é a carga do veículo mas também mais caro é o custo do aparelho. Existem diversos modelos de carregadores de podem ser utilizados para o carregamento de veículos elétricos, desde os mais fracos, que são de 2kW, carregando o veículo em média de 8h, até os mais potentes, que possuem uma potência se até 50kW, capazes de carregar o veículo em menos de 1 hora, os chamados carregadores de carga rápida (SOUSA, 2015).

Como é uma tecnologia ainda cara, vamos considerar que os carregadores a serem utilizados neste trabalho serão os chamados carregadores semi-rápidos, que possuem uma potência média de 7kW. Portanto, considerando que serão realizados 4 carregamentos mensais e que o carregador a ser utilizado será de 8kW, e a bateria do veículo sendo de 40kWh, temos que ao longo de um mês o total de energia a ser utilizada para o carregamento do veículo será de aproximadamente 160 kWh, totalizando um total de 665

kWh por mês. Esta quantidade de energia representará um aumento de R\$ 120,77 na fatura do proprietário, e aumentará a demanda de potência média em 0,22 kW.

## 7.2 Simulações OpenDSS

A partir dos dados do alimentador obtidos pela CEB foi possível realizar simulações do fluxo de potência do alimentador alterando-se as cargas conectadas ao mesmo.

As simulações realizadas foram variando de acordo com os diferentes níveis de penetração de veículos elétricos a serem utilizados pelos consumidores atendidos pelo alimentador em questão. Além disto, outro fator que influenciou nos resultados obtidos foi a diferença do comportamento do proprietário com relação ao seu carregamento, se ele foi feito periodicamente ao longo do mês ou se o proprietário apenas carregava o veículo quando havia necessidade.

### 7.2.1 Simulação sem nenhum veículo conectado à rede.

Desta maneira, primeiramente realizando a simulação do alimentador sem nenhuma inserção de veículo elétrico sendo carregado na rede temos os seguinte resultados:

Características gerais do alimentador:

```

Max pu. tensão = 1.0405
Min pu. tensão = 1.0098
Potência Ativar: 0.0232934
MW
Potência Reativar: -0.0060322
Mvar
Frequência = 60 Hz

```

Figura 20 – Características da Rede - Caso Normal

Obtendo os seguintes valores de tensão nos barramentos:

Barramento	Mag:	V1 (kV)	p.u.
m5710715-1004		8.047	1.01
m5710715-1004-c		8.047	1.01

Figura 21 – Tensões Caso Normal

As seguintes tensões nas cargas:

Em seu estado normal, a curva de carga do alimentador é dada pelo seguinte gráfico:

Barramento	Fase	Magnitude, A	Ângulo	(Real)	+j	(Imag)
M5710715-1004	1	0.99682	/_ -165.5 =	-0.96489	+j	-0.25029
M5710715-1004	2	0.99665	/_ 74.5 =	0.26624	+j	0.96043
M5710715-1004	3	0.99664	/_ -45.5 =	0.69865	+j	-0.71076

Figura 22 – Correntes Caso Normal

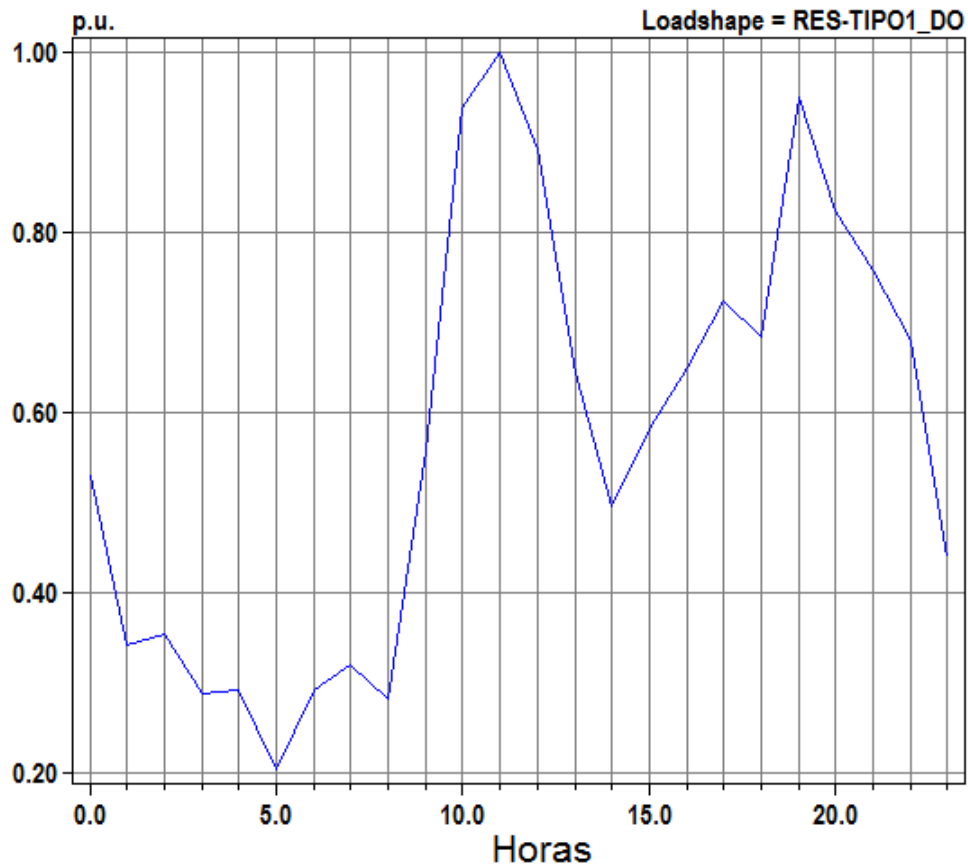


Figura 23 – Curva de Carga

Portanto podemos ver atuando em regime permanente o alimentador atende aos requisitos estabelecidos, possui sua tensão máxima de 1.0405 pu e mínima de 1.0098, que estão dentro do limite designado. Além disto podemos ver que o comportamento das tensões e correntes não é comprometido ao longo do consumo, estando estáveis e atendendo às cargas corretamente.

## 7.2.2 Simulações Considerando Cargas Distribuídas

Para as próximas simulações, vamos considerar que o carregamento do veículo elétrico será realizado uniformemente ao longo dos dias do mês, de forma que a potência média das cargas atendidas pelo alimentador seja de 0,92kW. Desta forma faremos

simulações considerando os diferentes níveis de penetração estipulados acima.

### 7.2.2.1 Porcentagem de Veículos Sendo Carregados - 5%

Os veículos elétricos não pertencem a nem 1% da frota de nacional de veículos, por isso, em um primeiro estágio é feita uma simulação considerando que 5% dos consumidores atendidos pelo alimentador serão proprietários de veículos elétricos e realizarão o seu carregamento de forma dividida ao longo do mês. Os seguintes resultados foram obtidos pela simulação, comparando com a simulação do caso normal:

<b>Propriedade</b>	<b>Caso Normal</b>	<b>Veículos Conectados - 5%</b>
Tensão Máx (pu)	1,0405	1,0405
Tensão Mín (pu)	1,0098	1,0098
Potência Ativa (MW)	0,0232934	0,023928
Tensão na Carga(V)	228	228
Corrente(A)	0,99	1,011

Tabela 3 – Comparação Caso Normal x 5% de Veículos Conectados

É possível perceber que não houve alteração significativa nas propriedades do sistema, apenas a potência ativa apresentou um aumento de aproximadamente 2% e a corrente que apresentou um aumento também de aproximadamente 2%.

### 7.2.2.2 Porcentagem de Veículos Sendo Carregados - 15%

Agora em um cenário mais promissor será considerado que dos consumidores atendidos pelo alimentador tratado, 15% deles serão proprietários de veículos elétricos. Após a realização das simulações pode-se obter os seguintes resultados:

<b>Propriedade</b>	<b>Caso Normal</b>	<b>Veículos Conectados - 15%</b>
Tensão Máx (pu)	1,0405	1,0405
Tensão Mín (pu)	1,0098	1,0098
Potência Ativa (MW)	0,0232934	0,033628
Tensão na Carga(V)	228	228
Corrente(A)	0,99	1,21

Tabela 4 – Comparação Caso Normal x 15% de Veículos Conectados

Da mesma maneira como na simulação com 5% dos veículos conectados à rede, neste caso temos que apenas as potência ativa e a corrente sofreram alguma alteração em comparação com o caso normal.

### 7.2.2.3 Porcentagem de Veículos Sendo Carregados - 30%

Tendo em vista que até 15% de veículos sendo conectados à rede não houve impacto significativo na rede, nesta situação a simulação será realizada considerando que 30% dos consumidores do alimentados serão proprietários de veículos elétricos, para se extrapolar um cenário considerável de veículos elétricos sendo utilizados para identificar a capacidade de hospedagem da rede, obtendo os seguintes resultados:

<b>Propriedade</b>	<b>Caso Normal</b>	<b>Veículos Conectados - 30%</b>
Tensão Máx (pu)	1,0405	1,0405
Tensão Mín (pu)	1,0098	1,0098
Potência Ativa (MW)	0,0232934	0,043722
Tensão na Carga(V)	228	228
Corrente(A)	0,99	1,38

Tabela 5 – Comparação Caso Normal x 30% de Veículos Conectados

Da mesma maneira como nas simulações realizadas anteriormente nesta seção, temos que apenas a potência ativa e a corrente sofreram alterações, o que mostra que com 30% de veículos sendo conectados à rede com esta configuração, com a necessidade do aumento de entrega de potência haverá conseqüentemente um aumento de corrente elétrica, porém o sistema é capaz de suprir esta nova demanda sem que haja algum problema estrutural.

### 7.2.2.4 Porcentagem de Veículos Sendo Carregados - 50%

Como visto anteriormente, com 30% de veículos sendo conectados à rede, o alimentador é capaz de suprir a nova carga de forma segura garantindo a qualidade da energia entregue. Para o caso da próxima simulação será considerado um caso bem avançado de veículos elétricos presentes na rede, para identificar se a rede ainda assim será capaz de atender a demanda. Neste próximo caso serão considerados 50% dos consumidores como proprietários de veículos elétricos. Após a simulação os seguintes resultados foram obtidos:

<b>Propriedade</b>	<b>Caso Normal</b>	<b>Veículos Conectados - 50%</b>
Tensão Máx (pu)	1,0405	1,0405
Tensão Mín (pu)	1,0098	0,9978
Potência Ativa (MW)	0,0232934	0,0829715
Tensão na Carga(V)	228	227,3
Corrente(A)	0,99	2,12

Tabela 6 – Comparação Caso Normal x 50% de Veículos Conectados

Após a realização deste caso extremo, ao contrário das simulações feitas anteriormente, mais propriedades sofreram alterações devido à nova carga. A tensão mínima

reduziu para 0,9978 pu, a tensão na carga também reduziu, para 227,3 V, e como nas outras simulações, a potência ativa e a corrente aumentaram. Porém, mesmo com estas alterações a rede operando em regime permanente continua atendendo aos requisitos de segurança e qualidade.

### 7.2.3 Simulações Considerando Cargas Diárias

Vimos nas simulações realizadas anteriormente que o carregamento de veículos elétricos feito de maneira distribuída ao longo do mês não apresenta nenhum impacto na rede. Porém, nesta seção faremos simulações que condizem mais com a realidade, ou seja, o proprietário de um veículo elétrico não vai carregar em pequenas frações seu veículo diariamente, mas sim carregar seu veículo com carregamentos sendo realizados assim que houver necessidade, sendo carregamentos periódicos durante o mês, porém, estando conectado por um período muito maior.

Desta forma, considerando que o carregamento será realizado todo em um dia, temos que o total de energia a ser consumida neste processo é equivalente aproximadamente ao banco de baterias do carro, portanto, 40 kWh. Esta energia para o carregamento do veículo vai aumentar a potência média da carga em 1,66 kW (somente nos dias de carregamento). Portanto, para estas simulações a potência média da carga agora será de 2.36 kW.

Os casos a serem simulados seguirão o mesmo padrão dos realizados na seção anterior, onde o nível de veículos conectados à rede aumentará gradativamente entre 5%, 15%, 30% e 50%.

#### 7.2.3.1 Porcentagem de Veículos Sendo Carregados - 5%

Primeiramente, realizando a simulação considerando que apenas 5% dos consumidores do alimentador serão proprietários de veículos elétricos, e estes realizarão o carregamento apenas de forma completa em um dia, temos os seguintes resultados:

<b>Propriedade</b>	<b>Caso Normal</b>	<b>Veículos Conectados - 5%</b>
Tensão Máx (pu)	1,0405	1,0405
Tensão Mín (pu)	1,0098	1,0098
Potência Ativa (MW)	0,0232934	0,0495708
Tensão na Carga(V)	228	228
Corrente(A)	0,99	1,45

Tabela 7 – Comparação Caso Normal x 5% de Veículos Conectados Direto

Da mesma maneira como na seção anterior, apenas a potência ativa e a corrente sofreram alterações com a nova carga, porém estas sofreram um aumento muito maior se

comparadas à primeira seção, devido à demanda da carga ser maior.

### 7.2.3.2 Porcentagem de Veículos Sendo Carregados - 15%

Considerando agora que 15% dos consumidores atendidos pelo alimentador serão proprietários de veículos elétricos, temos os seguintes resultados: Da mesma maneira vista

<b>Propriedade</b>	<b>Caso Normal</b>	<b>Veículos Conectados - 15%</b>
Tensão Máx (pu)	1,0405	1,0405
Tensão Mín (pu)	1,0098	1,0098
Potência Ativa (MW)	0,0232934	0,06749
Tensão na Carga(V)	228	228
Corrente(A)	0,99	2,72

Tabela 8 – Comparação Caso Normal x 15% de Veículos Conectados Direto

na seção anterior, para 15% de veículos conectados à rede, temos que apenas a potência ativa e a corrente sofreram alterações, sendo estas bem superiores do que a simulação feita para 15% de veículos conectados à rede.

### 7.2.3.3 Porcentagem de Veículos Sendo Carregados - 30%

Considerando agora que 30% dos consumidores realizarão o carregamento de seus veículos conectados à rede de maneira direta em um dia temos os seguintes resultados:

<b>Propriedade</b>	<b>Caso Normal</b>	<b>Veículos Conectados - 30%</b>
Tensão Máx (pu)	1,0405	1,0404
Tensão Mín (pu)	1,0098	0,9289
Potência Ativa (MW)	0,0232934	0,16793
Tensão na Carga(V)	228	227
Corrente(A)	0,99	4,31

Tabela 9 – Comparação Caso Normal x 30% de Veículos Conectados Direto

Após a realização da simulação podemos ver que desta vez todas as propriedades comparadas sofreram alterações. A tensão mínima em pu obtida foi de 0,9289 pu, o que se encontra em um estado de uma tensão de atendimento classificada como precária. Houve um aumento considerável da potência ativa e conseqüentemente da corrente. Portanto, era esperado que com o aumento da demanda houvesse uma queda de tensão, porém o sistema nesta configuração não é capaz de atender a carga apresentando uma queda de tensão dentro dos limites estabelecidos (ANEEL, 2009).

#### 7.2.3.4 Porcentagem de Veículos Sendo Carregados - 50%

Para o último caso teremos que 50% dos consumidores serão proprietários de veículos elétricos. Como com 30% já foi possível analisar um impacto considerável na rede, é esperado que com 50% seja obtido um impacto muito maior e extremo para o funcionamento da rede. Após a realização da simulação os seguintes resultados foram obtidos:

Propriedade	Caso Normal	Veículos Conectados - 50%
Tensão Máx (pu)	1,0405	1,0404
Tensão Mín (pu)	1,0098	0,8599
Potência Ativa (MW)	0,0232934	0,39271
Tensão na Carga(V)	228	226,7
Corrente(A)	0,99	7,2

Tabela 10 – Comparação Caso Normal x 50% de Veículos Conectados Direto

Como era esperado, todas as propriedades sofreram alterações. A tensão mínima desta medida desta vez foi de 0,8599 pu, valor muito abaixo do mínimo exigido pela regulamentação, fazendo com que a tensão de atendimento seja classificada em uma situação crítica. Com o aumento da demanda de carga houve um aumento considerável da potência ativa e da corrente. Além do impacto da queda de tensão causado pela aumento da demanda, a nova corrente exigida é muito maior do que o valor para o caso normal da simulação, colocando em risco os equipamentos do sistema alimentador (ANEEL, 2009).

#### 7.2.4 Programa auxiliar para alteração de cargas

Como visto anteriormente, as cargas do sistemas são representadas com a utilização da função *New.Load*, em que um dos parâmetros da carga a serem discretizados no software é a potência média. É por meio da alteração destas cargas que o usuário consegue simular as condições do alimentador caso uma nova carga seja conectada ao sistema. Como o circuito alimentador em questão possui muitas cargas discretizadas, tem-se que a alteração destas, feitas uma por uma, seria um procedimento dispensioso para a realização do trabalho. Portanto, a solução encontrada foi a utilização de um programa que seja capaz de converter o valor da carga para um novo valor desejado.

O programa proposto foi feito em linguagem python utilizando uma ferramenta de manipulação de *string*, onde o usuário primeiro digita ao programa qual expressão que ele quer que seja alterada e em seguida qual a nova expressão que ele quer que apareça. O código do programa fica da seguinte maneira:

```

entrada = str(input('Qual o valor que deseja substituir?'))
saida = str(input('Qual o novo valor que deseja simular?'))
while True:

```



```
frase = str(input())
print(frase.replace(entrada,saida))
if frase == 'fim':
    break
```

Ao ser executado, o programa primeiramente solicita ao usuário qual a expressão a ser substituída, que recebe o nome da variável entrada, em seguida o programa solicita ao usuário qual a expressão que será incrementada no lugar da expressão de entrada, recebendo o nome de saída. Em seguida por meio da estrutura de repetição *while*, o laço de repetição é criado, em seguida a variável frase é incrementada no programa, é nesta frase que o valor a ser substituído estará presente, após a frase ser inputada o programa faz uma leitura desta frase e identifica onde está o valor a ser substituído e o substitui pelo valor desejado, isto é feito pelo método *replace*. Por último há o comando *print* que faz descreve no terminal do programa a nova frase com o novo valor desejado. Portanto, utilizando de exemplo a carga descrita como da seguinte forma:

```
New "Load.BT_101881_M1"bus1="B17438925710449-1-TR0494_112T.1.2.3.0"
phases=3 conn=Delta model=2 kv=0.38 kw=0.7 pf=0.92
vmaxpu=1.5 vminpu=0.92
```

Temos que a potência que será simulada é de 0,7 kW, supondo que o interesse seja de simular como uma nova potência de 0,9kW então o usuário do programa deverá digitar como entrada o valor 0.7kw e como saída o valor 0.9kW. O resultado obtido após o programa ser executado é:

```
New "Load.BT_101881_M1"bus1="B17438925710449-1-TR0494_112T.1.2.3.0"
phases=3 conn=Delta model=2 kv=0.38 kw=0.9 pf=0.92
vmaxpu=1.5 vminpu=0.92
```

Como são muitos os casos a serem simulados, a utilização deste programa otimizou o processo de realização das simulações. Um exemplo do programa sendo executado pode ser visto na figura a seguir:

Desta forma, para facilitar no processo de realização das simulações, os arquivos contendo as cargas eram inputados no programa (até a quantidade desejada para ser alterada), e então o programa era executado. Em seguida os novos valores obtidos eram então inputados nos software OpenDSS no mesmo local das cargas originais, mantendo o posicionamento das cargas a serem simuladas apenas alterando os seus valores de potência média.

Como exemplo destas alterações seguem um conjunto de 16 cargas que foram alteradas de uma potência média de 0,7 kW para uma potência média de 0,9 kW. Antes da

```

===== RESTART: C:\Users\gustavo\Documents\UnB\TCC\Python\Simulador.py =====
Qual o valor que deseja substituir?kw=0.7
Qual o novo valor que deseja simular?kw=0.9
New "Load.BT\_101881\_M1" bus1="B17438925710449-1-TR0494\_112T.1.2.3.0"

phases=3 conn=Delta model=2 kv=0.38 kw=0.7 pf=0.92

vmaxpu=1.5 vminpu=0.92

New "Load.BT\_101881\_M1" bus1="B17438925710449-1-TR0494\_112T.1.2.3.0"

phases=3 conn=Delta model=2 kv=0.38 kw=0.9 pf=0.92

vmaxpu=1.5 vminpu=0.92

```

Figura 24 – Exemplo Programa para alterar valores de carga

alteração das cargas, elas estavam representadas da seguinte forma no software OpenDSS:

```

! Criação da seção de cargas BT
New "Load.BT_IP255190_M1" bus1="B5709468" phases=1 conn=Wye model=2 kv=0.219393102 kw=0.7 pf=0.92 vmaxpu=1.5 vminpu=0.92
New "Load.BT_IP255190_M2" bus1="B5709468" phases=1 conn=Wye model=3 kv=0.219393102 kw=0.7 pf=0.92 vmaxpu=1.5 vminpu=0.92
New "Load.BT_102497_M1" bus1="COD40000239.1.2.3.0" phases=3 conn=Delta model=2 kv=0.38 kw=0.7 pf=0.92 vmaxpu=1.5 vminpu=0.92
New "Load.BT_102497_M2" bus1="COD40000239.1.2.3.0" phases=3 conn=Delta model=3 kv=0.38 kw=0.7 pf=0.92 vmaxpu=1.5 vminpu=0.92
New "Load.BT_101881_M1" bus1="B17438925710449" phases=3 conn=Delta model=2 kv=0.38 kw=0.7 pf=0.92 vmaxpu=1.5 vminpu=0.92
New "Load.BT_101881_M2" bus1="B17438925710449" phases=3 conn=Delta model=3 kv=0.38 kw=0.7 pf=0.92 vmaxpu=1.5 vminpu=0.92
New "Load.BT_101882_M1" bus1="B17438935710449" phases=3 conn=Delta model=2 kv=0.38 kw=0.7 pf=0.92 vmaxpu=1.5 vminpu=0.92
New "Load.BT_101882_M2" bus1="B17438935710449" phases=3 conn=Delta model=3 kv=0.38 kw=0.7 pf=0.92 vmaxpu=1.5 vminpu=0.92
New "Load.BT_101883_M1" bus1="B17438985709709" phases=3 conn=Delta model=2 kv=0.38 kw=0.7 pf=0.92 vmaxpu=1.5 vminpu=0.92
New "Load.BT_101883_M2" bus1="B17438985709709" phases=3 conn=Delta model=3 kv=0.38 kw=0.7 pf=0.92 vmaxpu=1.5 vminpu=0.92
New "Load.BT_101884_M1" bus1="B17439005710564" phases=3 conn=Delta model=2 kv=0.38 kw=0.7 pf=0.92 vmaxpu=1.5 vminpu=0.92
New "Load.BT_101884_M2" bus1="B17439005710564" phases=3 conn=Delta model=3 kv=0.38 kw=0.7 pf=0.92 vmaxpu=1.5 vminpu=0.92
New "Load.BT_101885_M1" bus1="B17439015710564" phases=3 conn=Delta model=2 kv=0.38 kw=0.7 pf=0.92 vmaxpu=1.5 vminpu=0.92
New "Load.BT_101885_M2" bus1="B17439015710564" phases=3 conn=Delta model=3 kv=0.38 kw=0.7 pf=0.92 vmaxpu=1.5 vminpu=0.92
New "Load.BT_101886_M1" bus1="B17439035710284" phases=3 conn=Delta model=2 kv=0.38 kw=0.7 pf=0.92 vmaxpu=1.5 vminpu=0.92
New "Load.BT_101886_M2" bus1="B17439035710284" phases=3 conn=Delta model=3 kv=0.38 kw=0.7 pf=0.92 vmaxpu=1.5 vminpu=0.92

```

Figura 25 – Cargas antes da alteração

Após a execução do programa, temos que as novas cargas estão representadas agora com a potência média desejada, que pode ser visto na imagem abaixo:

```

! Criação da seção de cargas BT
New "Load.BT_IP255190_M1" bus1="B5709468" phases=1 conn=Wye model=2 kv=0.219393102 kw=0.9 pf=0.92 vmaxpu=1.5 vminpu=0.92
New "Load.BT_IP255190_M2" bus1="B5709468" phases=1 conn=Wye model=3 kv=0.219393102 kw=0.9 pf=0.92 vmaxpu=1.5 vminpu=0.92
New "Load.BT_102497_M1" bus1="COD40000239.1.2.3.0" phases=3 conn=Delta model=2 kv=0.38 kw=0.9 pf=0.92 vmaxpu=1.5 vminpu=0.92
New "Load.BT_102497_M2" bus1="COD40000239.1.2.3.0" phases=3 conn=Delta model=3 kv=0.38 kw=0.9 pf=0.92 vmaxpu=1.5 vminpu=0.92
New "Load.BT_101881_M1" bus1="B17438925710449" phases=3 conn=Delta model=2 kv=0.38 kw=0.9 pf=0.92 vmaxpu=1.5 vminpu=0.92
New "Load.BT_101881_M2" bus1="B17438925710449" phases=3 conn=Delta model=3 kv=0.38 kw=0.9 pf=0.92 vmaxpu=1.5 vminpu=0.92
New "Load.BT_101882_M1" bus1="B17438935710449" phases=3 conn=Delta model=2 kv=0.38 kw=0.9 pf=0.92 vmaxpu=1.5 vminpu=0.92
New "Load.BT_101882_M2" bus1="B17438935710449" phases=3 conn=Delta model=3 kv=0.38 kw=0.9 pf=0.92 vmaxpu=1.5 vminpu=0.92
New "Load.BT_101883_M1" bus1="B17438985709709" phases=3 conn=Delta model=2 kv=0.38 kw=0.9 pf=0.92 vmaxpu=1.5 vminpu=0.92
New "Load.BT_101883_M2" bus1="B17438985709709" phases=3 conn=Delta model=3 kv=0.38 kw=0.9 pf=0.92 vmaxpu=1.5 vminpu=0.92
New "Load.BT_101884_M1" bus1="B17439005710564" phases=3 conn=Delta model=2 kv=0.38 kw=0.9 pf=0.92 vmaxpu=1.5 vminpu=0.92
New "Load.BT_101884_M2" bus1="B17439005710564" phases=3 conn=Delta model=3 kv=0.38 kw=0.9 pf=0.92 vmaxpu=1.5 vminpu=0.92
New "Load.BT_101885_M1" bus1="B17439015710564" phases=3 conn=Delta model=2 kv=0.38 kw=0.9 pf=0.92 vmaxpu=1.5 vminpu=0.92
New "Load.BT_101885_M2" bus1="B17439015710564" phases=3 conn=Delta model=3 kv=0.38 kw=0.9 pf=0.92 vmaxpu=1.5 vminpu=0.92
New "Load.BT_101886_M1" bus1="B17439035710284" phases=3 conn=Delta model=2 kv=0.38 kw=0.9 pf=0.92 vmaxpu=1.5 vminpu=0.92
New "Load.BT_101886_M2" bus1="B17439035710284" phases=3 conn=Delta model=3 kv=0.38 kw=0.9 pf=0.92 vmaxpu=1.5 vminpu=0.92

```

Figura 26 – Cargas depois da alteração

### 7.3 Simulações Tarifárias

Além da análise do impacto do carregamento de veículos elétricos na rede este trabalho também possui como objetivo analisar o impacto econômico que o carregamento do veículo elétrico causará a seu proprietário. Um dos atrativos de veículos elétricos é a possível economia que estes veículos podem trazer a seu proprietário. Além de ter uma manutenção bem mais prática do que os veículos convencionais a combustão interna, a fonte de energia deste veículo é a eletricidade. O objetivo desta seção é entender qual o possível impacto financeiro positivo que o veículo elétrico pode trazer a seu proprietário.

Como a fonte de energia para recarregar as baterias do veículo elétrico é a eletricidade, a maneira de avaliar o custo de sua recarga é analisando com base na tarifa de energia vigente no local do carregamento. Com este fim será feita uma análise do custo do carregamento residencial de um veículo elétrico.

Para a análise será considerado o mesmo caso feito nas simulações vistas nas seções anteriores, um proprietário que possui um consumo de energia em média de 504 kWh por mês. Utilizando do mesmo critério visto nas simulações anteriores, será considerado que em um mês aproximadamente 4 carregamentos completos do veículo serão realizados, o que acrescenta ao consumo médio mensal do proprietário aproximadamente 160 kWh, totalizando um consumo médio mensal de 664 kWh.

De uma maneira simples, considerando que o consumidor em análise está situado na categoria residencial normal com média mensal acima de 500 kWh, temos que a tarifa a ser cobrada será de 0,7548647 R\$/kWh. Logo, a conta de energia do proprietário será de aproximadamente R\$ 501,23, sem considerar os adicionais.

Analisando o gasto apenas para o carregamento do veículo, temos que o custo é de aproximadamente R\$ 120,77. Os cálculos realizados até então foram considerados que o consumidor percorrerá uma distância de aproximadamente 975 km por mês. Portanto, o gasto por km rodado pelo consumidor será de aproximadamente 0,12 R\$/km.

Comparando com relação ao um veículo convencional a combustão interna, com cilindrada pequena (1000 cilindradas), tem-se que seu rendimento em vias rápidas é de aproximadamente 17 km/l de gasolina. (PORTO, 2012). Temos que para percorrer os mesmos 975 km por mês um veículo a gasolina precisará de aproximadamente 57 litros de gasolina. No atual momento de realização deste trabalho temos que o preço da gasolina em média está custando R\$ 4,30. Portanto, para percorrer 975 km em um mês em um veículo a combustão considerado econômico serão necessários R\$ 246,00. Dando um custo de aproximadamente 0,25 R\$/km.

Porém, os veículos elétricos são veículos que em suas versões de entrada já são considerados veículos de categoria premium, portanto, esta comparação para ser mais fidedigna deverá levar em consideração uma categoria de veículo a combustão interna

mais sofisticada. Comparando a um veículo de combustão interna com motorização de 1600 cilindradas, temos que o seu rendimento é de aproximadamente 12 km/l de gasolina (PORTO, 2012). Portanto, para a mesma distância mensal escolhida para estes cálculos, e o valor do combustível utilizado em questão, temos que o custo mensal com o combustível será de R\$ 349,37. Indicando um custo de aproximadamente R\$ 0,36/km.

Portanto, com relação ao valor gasto com a fonte de energia dos veículos, temos que os veículos elétricos são em média 100% mais eficientes que os veículos a combustão interna de pequeno porte. Porém, atualmente os veículos elétricos disponíveis no mercado nacional são de categorias mais elaboradas. Comparando com veículos de mesma categoria e porte, tem-se que a eficiência econômica dos veículos elétricos é em média 3 vezes maior do que se comparado aos veículos a combustão interna. Porém, o veículo elétrico ainda é uma opção pouco viável no mercado nacional, o que faz com que esta diferença de custo por km rodado se torne um investimento positivo a longo prazo.

Analisando agora com relação à economia na tarifa de energia, serão feitas análises da diferença entre as tarifas caso o proprietário de um veículo elétrico opte pela tarifa branca.

### 7.3.1 Diferenças entre tarifas

A tarifa branca é uma opção nova com relação aos modelos tarifários de energia elétrica, porém o consumidor deve analisar muito bem suas condições para identificar se ao aderir à tarifa branca estará recebendo algum benefício ou não.

Portanto, para avaliar os custos relacionados às tarifas vigentes serão feitas simulações considerando alguns casos de comportamento de carga, para identificar se a tarifa branca pode ou não trazer retorno para o proprietário.

#### 7.3.1.1 Curva de Carga Normal

Em um primeiro caso será considerado que o proprietário do veículo apresentará um comportamento de carga residencial padrão aos observados até então, tendo uma elevação da energia consumida a partir das 17h até as 22h, o chamado horário de pico. Após a realização da simulação, temos a seguinte diferença de valores entre as tarifas:

Modelo Tarifário	Custo R\$
Tarifa Normal	626,38
Tarifa Branca	804,99

Tabela 11 – Comparação Tarifa Normal x Tarifa Branca

Após a simulação podemos tem-se que a opção de aderir à tarifa branca não é

viável para este caso, pois ela possui um valor de aproximadamente 28,5% mais caro que a tarifa normal. A tarifa branca possui 3 valores diferentes de tarifa que são cobradas do consumidor, variando de acordo com o horário. Dos 3 valores possíveis da tarifa branca apenas em um deles há realmente um desconto trazendo benefício ao consumidor, nos outros o valor cobrado acaba por ser mais caro que o valor da tarifa convencional. E o valor mais caro é justamente durante o período de pico do sistema, que foi o horário onde houve a maior utilização de energia nesta simulação.

Para próxima simulação será considerado que o consumo diário de energia ocorre de maneira uniforme ao longo do dia, portanto, sem variações da demanda. Desta maneira tivemos o seguinte resultado:

<b>Modelo Tarifário</b>	<b>Custo R\$</b>
Tarifa Normal	626,38
Tarifa Branca	622,20

Tabela 12 – Comparação Tarifa Normal x Tarifa Branca

Após a realização da simulação temos que nesta configuração o valor a ser cobrado das tuas tarifas é muito próximo um do outro, porém é um caso muito específico em que o proprietário tem que garantir que o consumo de energia de sua residência seja feito igualmente durante o dia, o que é algo impraticável.

### 7.3.1.2 Curva de Carga fora do Pico

Por último, para esta simulação será considerado que o proprietário do veículo elétrico que aderiu à tarifa branca terá todo o seu consumo de energia realizado fora do horário de pico da rede, sendo todo o seu consumo realizado nos horários em que há desconto na tarifa branca. No horário de pico apenas uma pequena parcela de energia será consumida. Desta forma, os seguintes resultados foram obtidos:

<b>Modelo Tarifário</b>	<b>Custo R\$</b>
Tarifa Normal	626,38
Tarifa Branca	524,21

Tabela 13 – Comparação Tarifa Normal x Tarifa Branca

Após a realização desta simulação, foi possível observar que a tarifa branca trouxe um desconto de aproximadamente 16% na cobrança de energia. Porém, isto só é possível caso o proprietário consiga deslocar todo o seu consumo de energia para os horários fora de pico, deixando no horário de pico apenas o necessário consumindo energia. Esta prática para grande maioria da população é impraticável devido ao horário de pico ser justamente

---

o horário em que a maioria da população está retornando para casa. Portanto, só é viável caso a pessoa tenha a opção de deslocar o seu consumo de energia para outros horários.

## 8 Conclusão

O acesso à um adequado sistema de distribuição de energia elétrica é algo fundamental para o desenvolvimento da sociedade atual, muito da atual tecnologia desenvolvida depende de uma fonte de eletricidade. Os sistemas de distribuição de energia elétrica foram projetados há anos e aos poucos, de acordo com o avanço tecnológico, foram recebendo alterações de melhorias ou expansão para atender às novas demandas. Atualmente alguns exemplos de tecnologias desenvolvidas que atuam diretamente nos sistemas de distribuição são os painéis fotovoltaicos e as veículos elétricos.

A atual rede de distribuição de energia elétrica não foi configurada para realizar a carga de veículos elétricos, portanto, o aumento da inserção de veículos sendo carregados pela rede pode representar um risco direto nos sistemas elétricos. Com o propósito de identificar possíveis impactos do carregamento de veículos elétricos, neste trabalho foram realizadas simulações de um alimentador real da cidade de Brasília-DF no software OpenDSS. As simulações foram realizadas levando em consideração diferentes quantidades de veículos elétricos a serem carregados, visto que o veículo elétrico ainda é um produto muito caro e sua presença na frota nacional deverá aumentar gradativamente.

Além das simulações realizadas para identificar os possíveis impactos na rede, um estudo foi realizado para identificar o impacto econômico do veículo elétrico, comparando seus gastos com os gastos de veículos tradicionais a combustão interna e depois comparando o custo de seu carregamento a depender da tarifa de energia.

As simulações realizadas foram feitas em dois cenários, o primeiro com o veículo sendo carregado de maneira igualmente distribuída ao longo do mês, ou seja, o proprietário realiza a carga do seu veículo todo dia de maneira que este sempre esteja com a carga completa no dia seguinte, fazendo com que o tempo de carga diário seja menor. O segundo caso foi considerando que o proprietário realizará carregamentos apenas quando for necessário, portanto, toda vez que seu veículo estiver com a bateria para acabar o proprietário realizará o seu carregamento completo, fazendo com que o tempo de carga seja consideravelmente maior em relação ao primeiro caso.

Após a realização das simulações, no primeiro cenário de simulações temos que o carregamento dos veículos elétricos não apresenta impacto na rede de distribuição de energia elétrica. No último caso simulado, com uma fração de 50% dos veículos sendo conectados à rede, temos que as propriedades do sistema sofre pequenas alterações porém nada que passe dos limites estabelecidos, fazendo com que a rede possa ser operada no regime permanente garantindo a qualidade e segurança proposta.

Com a realização das simulações para o segundo cenário proposto, temos que o

carregamento de veículos elétricos apresentou um impacto considerável na rede de distribuição de energia elétrica. Com 30% dos veículos sendo carregados, as propriedades da rede já apresentaram alterações prejudiciais ao sistema. Houve um aumento considerável da corrente elétrica do sistema e conseqüentemente uma elevada queda de tensão, efeito de subtensão, passando dos limites estabelecidos. O cenário ficou ainda mais grave com a simulação realizada levando em consideração uma fração de 50% de veículos sendo carregados na rede, em que o valor de subtensão chegou a aproximadamente 0,85 pu, muito abaixo do limite inferior estabelecido. Porém, este é um cenário muito otimista com relação à quantidade de veículos elétricos a serem comprados pelo consumidor brasileiro, o veículo elétrico ainda está ganhando seu espaço no mercado mundial de veículos, os países com a maior quantidade de veículos elétricos são os países desenvolvidos, e mesmo assim a fração que eles ocupam nas respectivas frotas nacionais ainda é bem baixa. Logo, o impacto foi observado em um cenário que não condiz com a atual realidade. E como visto nas simulações realizadas no primeiro cenário, caso haja um controle e o carregamento seja feito de forma bem distribuída pelo proprietário e ao longo da rede, não temos a presença de impacto, o que pode ser uma solução caso isto venha a acontecer

Os valores utilizados para os níveis de veículos elétricos conectados à rede foram escolhidos desta maneira a fim de se identificar a capacidade de hospedagem da rede do alimentador em questão. Foram feitas simulações considerando uma fração de 30% e 50% veículos elétricos conectados à rede pois os valores anteriores não demonstraram impacto estrutural. Desta maneira, foram feitas outras simulações com valores relativamente exagerados de veículos conectados à rede para identificar a capacidade de hospedagem da mesma. A capacidade de hospedagem indica o limite de cargas que serão inseridas no sistema de forma a não ultrapassar os valores indicados na norma, com relação à segurança e qualidade da energia da rede.

Tratando agora das simulações com relação ao impacto econômico dos veículos elétricos, tem-se que ao se comparar com um veículo de combustão interna, o custo para a locomoção do veículo elétrico é de aproximadamente metade do custo do veículo movido a combustão. Esta simulação leva em consideração apenas o custo da fonte de energia necessária para a realização de determinado trajeto, sendo que para o veículo elétrico a fonte utilizada foi a eletricidade proveniente da rede elétrica e para o veículo a combustão foi utilizada a gasolina. Por mais que com relação ao custo de energia por km rodado do veículo elétrico ser menor, os veículos elétricos são bem mais caros que os veículos similares movidos à combustão interna, devido à tecnologia embarcada e também por ser um produto que faz parte de inovação. Portanto, para analisar em um total qual o benefício econômico de um veículo elétrico é necessário também avaliar outros custos, como seu custo inicial, manutenção e entre outros.

Analisando o impacto financeiro do carregamento de um veículo elétrico, temos



que caso o proprietário de um desses veículos tenha a oportunidade de aderir à tarifa branca, é importante que o mesmo faça uma análise do comportamento do seu consumo de energia para ver se é possível deslocar seu maior consumo para fora do horário de pico, que é o horário em que a tarifa fica mais cara. Caso isto seja possível então a tarifa branca é uma opção viável para o consumidor e a sua adesão trará um benefício econômico ao consumidor. Caso não seja possível a realização deste deslocamento, a tarifa branca não é uma opção viável para o consumidor, e este caso faça a adesão deste modelo tarifário estará pagando um valor considerável a mais do que se comparado à tarifa normal.

Após as realizações dos estudos e das simulações foi visto que a participação de veículos elétricos no Brasil ainda é pequena, o que é justificado pelas poucas opções no mercado nacional e também pelo custo do veículo ser elevado e não atraindo grande parte da população. Porém, com o avanço tecnológico, conseqüente redução nos custos e políticas públicas de incentivo temos um cenário promissor para o veículo elétrico no Brasil. Sendo assim, o número de veículos elétricos no Brasil deverá aumentar gradativamente ao longo dos próximos anos e ganhar uma expansão considerável nas próximas décadas.

Portanto, pode-se concluir que houve impacto na rede devido ao carregamento de veículos elétricos, porém isto foi observado apenas nos casos específicos em que a fração considerada de veículos elétricos era próxima ou acima de 30%. Considerando a atual participação de veículos elétricos na frota nacional, temos que este cenário ainda é bem distante e possivelmente quando este número for alcançado os sistemas de distribuição já terão sido submetidos à reformas em sua estrutura ou novas tecnologias já poderão ter sido implantadas, como as *smart grids*.

# Referências

- ANEEL. Prodist - módulo 8 - qualidade da energia elétrica. 2009. Citado 2 vezes nas páginas 54 e 55.
- ANEEL. *Tarifa Branca - ANEEL*. [S.l.]: SGT, 2017. <<http://www.aneel.gov.br/tarifa-branca>>, Acesso em: 28 out. 2018. Citado 3 vezes nas páginas 25, 30 e 34.
- CEB. *Tarifa Branca*. [S.l.]: CEB, 2018. <<http://www.ceb.com.br/index.php/component/content/article/83-tarifa-branca/476-tarifa-branca-de-energia>>, Acesso em: 23 out. 2019. Citado na página 25.
- CEB. *Tudo sobre a conta de luz*. [S.l.]: CEB, 2019. <<http://www.ceb.com.br/index.php/tudo-sobre-a-conta-de-luz/370-tudo-sobre-a-conta-de-luz>>, Acesso em: 22 nov. 2019. Citado 3 vezes nas páginas 34, 35 e 47.
- CHAN, C. C. The state of the art of electric and hybrid vehicles. 2002. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 20.
- EMADI, A.; LEE y. J.; RAJASHEKARA, K. Power electric and motor drives in electric, hybrid electric, and plug-in hybrid electric vehicles. 2008. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 20.
- ENERGY-WORLD. How will the growth of electric vehicles impact the grid. In: *Energy World*. [S.l.: s.n.], 2017. v. 11, p. 32–34. Citado na página 27.
- EPRI. Opends introductory training level 1. In: . [S.l.: s.n.], 2009. Citado 2 vezes nas páginas 36 e 37.
- GAONAC'H, T. Contribution à l'analyse de l'impact des véhicules électrifiés sur le réseau de distribution d'électricité. 2016. Citado 5 vezes nas páginas 12, 23, 24, 27 e 28.
- INL. *Plugged in: How Americans charge their electric cars*. [S.l.]: INL, 2018. <<https://avt.inl.gov/sites/default/files/pdf/arra/PluggedInSummaryReport.pdf>>, Acesso em: 28 set. 2019. Citado na página 23.
- MAPS. 2019. <<https://www.google.com.br/maps/preview>>, Acesso em: 27 nov. 2019. Citado na página 47.
- MARIOTTO, F. T. et al. Impactos econômicos de veículos elétricos na rede de distribuição de energia elétrica brasileira. The 12<sup>o</sup> Latin-American Congress On Electricity Generation and Transmission, 2017. Citado 3 vezes nas páginas 13, 15 e 23.
- MIRANDA, H. de et al. Aplicação métodos numéricos para estimativa de variáveis psicométricas. In: *Engenharia Agrícola*. [S.l.: s.n.], 2006. v. 26, p. 686–694. Citado na página 34.
- MIT. The future of the electric grid. In: *MIT Study on the future of the electric grid*. [S.l.: s.n.], 2011. v. 1, p. 109–122. Citado 2 vezes nas páginas 28 e 29.

- MOREIRA, D. M. G. Simulação de uma rede de distribuição com veículos elétricos e produção renovável. 2013. Citado 2 vezes nas páginas 18 e 24.
- PORTO, R. B. Comparação entre preferência e posse de carro: predições dos valores humanos, atributos do produto e variáveis sociodemográficas. 2012. Citado 2 vezes nas páginas 58 e 59.
- RIECK, F. G.; MACHIELSE, C.; DUIN, J. van. The future of mobility. 2017. Citado na página 11.
- SALGADO, R. S. Fluxo de potência - método de newton. 2015. Citado 2 vezes nas páginas 31 e 32.
- SILVA, V. L. P. Veículos elétricos: Impactos, barreiras e oportunidades da integração nos sistemas de energia. 2017. Citado 2 vezes nas páginas 12 e 27.
- SIMON, E. C. Avaliação de impactos da recarga de veículos elétricos em sistemas de distribuição. 2013. Citado 4 vezes nas páginas 19, 22, 30 e 34.
- SOUSA, M. Veículos elétricos: a rede de inovação da pesquisa de desenvolvimento no brasil. 2015. Citado 2 vezes nas páginas 14 e 48.
- VELA. *Electric Mobility Brasil instala a maior eletrovia do país na Via Dutra*. [S.l.]: VELA, 2018. <<http://www.velatinoamericano.com.br/pt/noticias/produtos-e-lancamentos/electric-mobility-brasil-instala-a-maior-eletovia-do-pais-na-via-dutra>>, Acesso em: 27 out. 2019. Citado na página 14.
- VONBUN, C. Impactos ambientais e econômicos dos veículos elétricos e híbridos *Plug-in*: Uma revisão da literatura. 2015. Citado 3 vezes nas páginas 11, 12 e 18.

# Apêndices

# APÊNDICE A – Resultados OpenDSS

## Summary

Results for Actor ID # 1  
CPU selected : 0  
Status = SOLVED  
Solution Mode = Daily  
Number = 24  
Load Mult = 1.000  
Devices = 12843  
Buses = 3734  
Nodes = 10453  
Control Mode =STATIC  
Total Iterations = 2  
Control Iterations = 1  
Max Sol Iter = 2

- Circuit Summary -

Year = 0  
Hour = 24  
Max pu. voltage = 1.0405  
Min pu. voltage = 1.0098  
Total Active Power: 0.0232934 MW  
Total Reactive Power: -0.0060322 Mvar  
Frequency = 60 Hz  
Mode = Daily  
Control Mode = STATIC  
Load Model = PowerFlow

## CIRCUIT ELEMENT CURRENTS

(Currents into element from indicated bus)

### Power Delivery Elements

Bus	Phase	Magnitude, A	Angle	(Real) +j (Imag)
-----	-------	--------------	-------	------------------

ELEMENT = "Vsource.SOURCE"

M5710715-1004	1	0.99682	/_ -165.5 =	-0.96489 +j -0.25029
M5710715-1004	2	0.99665	/_ 74.5 =	0.26624 +j 0.96043
M5710715-1004	3	0.99664	/_ -45.5 =	0.69865 +j -0.71076
-----				
M5710715-1004	0	0.99682	/_ 14.5 =	0.96489 +j 0.25029
M5710715-1004	0	0.99665	/_ -105.5 =	-0.26624 +j -0.96043
M5710715-1004	0	0.99664	/_ 134.5 =	-0.69865 +j 0.71076

SYMMETRICAL COMPONENT VOLTAGES BY BUS (for 3-phase buses)

Bus	Mag:	V1 (kV)	p.u.	V2 (kV)	%V2/V1	V0 (kV)	%V0/V1
m5710715-1004		8.047	1.01	3.911E-009	4.86E-008	1.173E-006	1.458E-005
m5710715-1004-c		8.047	1.01	3.69E-009	4.586E-008	1.173E-006	1.458E-005
m5710707-1004		8.047	1.01	1.731E-008	2.151E-007	1.18E-006	1.467E-005
m5710707-1004-c		8.047	1.01	1.732E-008	2.153E-007	1.18E-006	1.467E-005
m5709895-1004		8.047	1.01	3.922E-009	4.874E-008	1.18E-006	1.467E-005
m5709895-1004-c		8.047	1.01	3.946E-009	4.904E-008	1.18E-006	1.467E-005
m5709607-1004		8.047	1.01	1.799E-008	2.235E-007	1.18E-006	1.467E-005
m5709607-1004-c		8.047	1.01	1.8E-008	2.236E-007	1.18E-006	1.467E-005
b5709898-tr0007_45t		0.2283	1.04	3.424E-010	1.5E-007	2.108E-010	9.233E-008
b5710244-tr0069_45t		0.2283	1.04	6.246E-010	2.736E-007	3.574E-010	1.566E-007
b5710188-tr0070_75t		0.2283	1.04	2.126E-009	9.313E-007	1.911E-009	8.371E-007
b5709421-tr0134_30t		0.2283	1.04	5.502E-010	2.41E-007	2.363E-012	1.035E-009
b5710512-tr0153_75t		0.2283	1.04	2.963E-010	1.298E-007	2.165E-010	9.486E-008
b5709871-tr0301_30t		0.2283	1.04	3.829E-010	1.678E-007	3.241E-010	1.42E-007
b5709649-tr0332_45t		0.2283	1.04	2.137E-010	9.363E-008	1.885E-012	8.256E-010
b5710592-tr0365_30t		0.2283	1.04	1.022E-010	4.476E-008	4.753E-017	2.082E-014
b5709545-tr0396_45t		0.2283	1.04	7.069E-009	3.097E-006	6.868E-009	3.009E-006
b5710590-tr0453_45t		0.2283	1.04	1.164E-010	5.1E-008	3.738E-012	1.637E-009

Results for Actor ID # 1  
CPU selected : 0  
Status = SOLVED  
Solution Mode = Daily  
Number = 24  
Load Mult = 1.000  
Devices = 12843  
Buses = 3734  
Nodes = 10453  
Control Mode =STATIC  
Total Iterations = 2  
Control Iterations = 1  
Max Sol Iter = 2

- Circuit Summary -

Year = 0  
Hour = 24  
Max pu. voltage = 1.0405  
Min pu. voltage = 1.0098  
Total Active Power: 0.033628 MW  
Total Reactive Power: -0.00441393 Mvar  
Frequency = 60 Hz

Mode = Daily  
Control Mode = STATIC  
Load Model = PowerFlow

---

SYMMETRICAL COMPONENT VOLTAGES BY BUS (for 3-phase buses)

Bus	Mag:	V1 (kV)	p.u.	V2 (kV)	%V2/V1	V0 (kV)	%V0/V1
m5710715-1004 005		8.047	1.01	3.911E-009	4.86E-008	1.173E-006	1.458E-005
m5710715-1004-c 005		8.047	1.01	3.69E-009	4.586E-008	1.173E-006	1.458E-005
m5710707-1004 005		8.047	1.01	1.731E-008	2.151E-007	1.18E-006	1.467E-005
m5710707-1004-c 005		8.047	1.01	1.732E-008	2.153E-007	1.18E-006	1.467E-005
m5709895-1004 005		8.047	1.01	3.921E-009	4.873E-008	1.18E-006	1.467E-005
m5709895-1004-c 005		8.047	1.01	3.946E-009	4.904E-008	1.18E-006	1.467E-005
b5710186-tr0070_75t 1.102E-006		0.2283	1.04	3.29E-009	1.441E-006	2.516E-009	
b5710624-tr0070_75t 1.015E-006		0.2283	1.04	2.878E-009	1.261E-006	2.318E-009	
b5710498-tr0134_30t 1.066E-009		0.2283	1.04	5.5E-010	2.409E-007	2.433E-012	
b5710336-tr0134_30t 1.094E-009		0.2283	1.04	5.499E-010	2.409E-007	2.497E-012	
b5710335-tr0134_30t 1.053E-009		0.2283	1.04	5.502E-010	2.411E-007	2.404E-012	
b17443005710335-tr0134_30t 1.053E-009		0.2283	1.04	5.502E-010	2.411E-007	2.404E-012	

Bus                    Phase    Magnitude, A    Angle    (Real) +j (Imag)



ELEMENT = "Vsource.SOURCE"

M5710715-1004 1 1.1304 /\_ -170.7 = -1.1155 +j -0.18326

M5710715-1004 2 1.1303 /\_ 69.3 = 0.39958 +j 1.0573

M5710715-1004 3 1.1303 /\_ -50.7 = 0.71589 +j -0.87468

-----

M5710715-1004 0 1.1304 /\_ 9.3 = 1.1155 +j 0.18326

M5710715-1004 0 1.1303 /\_ -110.7 = -0.39958 +j -1.0573

M5710715-1004 0 1.1303 /\_ 129.3 = -0.71589 +j 0.87468

- Circuit Summary -

Year = 0  
Hour = 24  
Max pu. voltage = 1.0405  
Min pu. voltage = 1.0098  
Total Active Power: 0.033628 MW  
Total Reactive Power: 0.000398874 Mvar  
Frequency = 60 Hz  
Mode = Daily  
Control Mode = STATIC  
Load Model = PowerFlow

b5710389-tr0823\_45t 0.2283 1.04 3.672E-007 0.0001609 4.338E-009 1.9E-006

b5709478-tr0823\_45t 0.2283 1.04 3.672E-007 0.0001608 4.559E-009 1.997E-006

b5709892-tr0826\_30t 0.2283 1.04 3.704E-007 0.0001623 7.433E-012 3.256E-009

b5710650-tr0826\_30t 0.2283 1.04 3.704E-007 0.0001623 7.588E-012 3.324E-009

b5709889-tr0826\_30t 0.2283 1.04 3.704E-007 0.0001623 7.262E-012 3.182E-009

b17450645709889-tr0826\_30t 0.2283 1.04 3.704E-007 0.0001623 7.262E-012 3.182E-009

b17450665709889-tr0826\_30t 0.2283 1.04 3.704E-007 0.0001623 7.262E-012 3.182E-009

b17450675709889-tr0826\_30t 0.2283 1.04 3.704E-007 0.0001623 7.262E-012 3.182E-009

Bus Phase Magnitude, pu Angle (Real) +j (Imag)

ELEMENT = "Vsource.SOURCE"

M5710715-1004 1 1.539 /\_ -180.0 = -1.539 +j -0.00035872

M5710715-1004 2 1.5857 /\_ 59.8 = 0.79825 +j 1.3701

M5710715-1004 3 1.5578 /\_ -61.6 = 0.74076 +j -1.3704

b5710244-tr0069_45t	0.2283	1.04	3.702E-007	0.0001622	3.574E-010	1.566E-007
b5710188-tr0070_75t	0.2283	1.04	4.97E-007	0.0002177	1.911E-009	8.371E-007
b5709421-tr0134_30t	0.2283	1.04	3.704E-007	0.0001623	2.363E-012	1.035E-009
b5710512-tr0153_75t	0.2283	1.04	3.704E-007	0.0001623	2.165E-010	9.486E-008
b5709871-tr0301_30t	0.2283	1.04	1.145E-006	0.0005017	3.24E-010	1.42E-007

Year = 0  
 Hour = 24  
 Max pu. voltage = 1.0405  
 Min pu. voltage = 1.0098  
 Total Active Power: 0.0437221 MW  
 Total Reactive Power: 0.00313992 Mvar  
 Frequency = 60 Hz  
 Mode = Daily  
 Control Mode = STATIC  
 Load Model = PowerFlow  
 -----Load Model = PowerFlow

Power Delivery Elements

Bus	Phase	Magnitude, pu	Angle	(Real)	+j (Imag)
-----	-------	---------------	-------	--------	-----------

Bus	Phase	Magnitude, pu	Angle	(Real)	+j (Imag)
-----	-------	---------------	-------	--------	-----------

ELEMENT = "Vsource.SOURCE"

M5710715-1004	1	1.7906 /_ 176.9 =	-1.788 +j	0.097225
M5710715-1004	2	1.855 /_ 56.1 =	1.0349 +j	1.5395
M5710715-1004	3	1.8023 /_ -65.3 =	0.75309 +j	-1.6374

Bus	Phase	Magnitude, A	Angle	(Real)	+j (Imag)
-----	-------	--------------	-------	--------	-----------

ELEMENT = "Vsource.SOURCE"

M5710715-1004	1	3.6263 /_ 162.0 =	-3.448 +j	1.1233
M5710715-1004	2	3.2918 /_ 46.9 =	2.2478 +j	2.4049
M5710715-1004	3	3.7273 /_ -71.2 =	1.2002 +j	-3.5288

Year = 0  
 Hour = 24  
 Max pu. voltage = 1.0405

Min pu. voltage = 0.9978  
 Total Active Power: 0.0829715 MW  
 Total Reactive Power: 0.020863 Mvar  
 Frequency = 60 Hz  
 Mode = Daily  
 Control Mode = STATIC  
 Load Model = PowerFlow  
 -----

b5710566-tr0489_45t	0.2273	1.036	5.077E-007	0.0002234	7.451E-010	3.279E-007
b5710564-tr0494_112t	0.2275	1.037	2.358E-005	0.01036	2.446E-005	0.01075
b5710110-tr0539_75t	0.2282	1.04	4.567E-006	0.002001	2.174E-010	9.525E-008
b5710699-tr0570_30t	0.2282	1.04	8.057E-006	0.003531	2.827E-010	1.239E-007

- Circuit Summary -

Year = 0  
 Hour = 24  
 Max pu. voltage = 1.0405  
 Min pu. voltage = 1.0098  
 Total Active Power: 0.0495708 MW  
 Total Reactive Power: 0.00593108 Mvar  
 Frequency = 60 Hz  
 Mode = Daily  
 Control Mode = STATIC  
 Load Model = PowerFlow

---

CIRCUIT ELEMENT CURRENTS

(Currents into element from indicated bus)

Power Delivery Elements

Bus	Phase	Magnitude, A	Angle	(Real) +j (Imag)
-----	-------	--------------	-------	------------------

ELEMENT = "Vsource.SOURCE"

M5710715-1004	1	2.068 /_	173.2 =	-2.0534 +j 0.24526
M5710715-1004	2	2.068 /_	53.2 =	1.2396 +j 1.6553
M5710715-1004	3	2.068 /_	-66.8 =	0.81373 +j -1.9012

b5709585-tr1658_30t	0.2283	1.04	6.18E-009	2.708E-006	5.677E-009	2.487E-006
b5710687-tr1723_75t	0.2283	1.04	2.171E-010	9.509E-008	3.992E-013	1.749E-010
b5709562-tr1741_75t	0.2283	1.04	2.244E-010	9.832E-008	3.613E-013	1.583E-010
b5710641-tr1768_30t	0.2215	1.01	3.251E-010	1.467E-007	2.518E-016	1.137E-013

b5709449-tr1892_15t	0.2282	1.04	3.581E-008	1.569E-005	3.207E-008	1.405E-005
b5709674-tr1934_30t	0.2283	1.04	3.464E-010	1.517E-007	7.176E-016	3.144E-013

- Circuit Summary -

Year = 0  
Hour = 24  
Max pu. voltage = 1.0405  
Min pu. voltage = 1.0098  
Total Active Power: 0.0674936 MW  
Total Reactive Power: 0.0144879 Mvar  
Frequency = 60 Hz  
Mode = Daily  
Control Mode = STATIC  
Load Model = PowerFlow

---

(Currents into element from indicated bus)

Power Delivery Elements

Bus	Phase	Magnitude, A	Angle	(Real)	+j (Imag)
-----	-------	--------------	-------	--------	-----------

ELEMENT = "Vsource.SOURCE"

M5710715-1004	1	2.7289 /_	170.9 =	-2.7833	+j 0.44641
M5710715-1004	2	3.0094 /_	47.2 =	2.0443	+j 2.2085
M5710715-1004	3	2.7564 /_	-74.4 =	0.73899	+j -2.6555

Circuit Summary -

Year = 0  
Hour = 24  
Max pu. voltage = 1.0404  
Min pu. voltage = 0.89304  
Total Active Power: 0.167933 MW  
Total Reactive Power: 0.101277 Mvar  
Frequency = 60 Hz  
Mode = Daily  
Control Mode = STATIC  
Load Model = PowerFlow

b17444065709961-tr1658_30t	0.2282	1.04	2.343E-005	0.01027	6.149E-009	2.695E-006
b17449375709961-tr1658_30t	0.2282	1.04	2.343E-005	0.01027	6.149E-009	2.695E-006
b19883228248259-tr1658_30t	0.2282	1.04	2.343E-005	0.01027	6.149E-009	2.695E-006
b19889108248191-tr1658_30t	0.2282	1.04	2.343E-005	0.01027	5.675E-009	2.487E-006
b17444045710331-tr1658_30t	0.2282	1.04	2.343E-005	0.01027	5.675E-009	2.487E-006
b17444055710331-tr1658_30t	0.2282	1.04	2.343E-005	0.01027	5.675E-009	2.487E-006
b17450425710331-tr1658_30t	0.2282	1.04	2.343E-005	0.01027	5.675E-009	2.487E-006

Bus	Phase	Magnitude, A	Angle	(Real)	+j (Imag)
-----	-------	--------------	-------	--------	-----------

ELEMENT = "Vsource.SOURCE"

M5710715-1004	1	4.31 /_	162.0 =	-10.611 +j	3.4473
M5710715-1004	2	4.21 /_	32.7 =	9.5863 +j	6.1572
M5710715-1004	3	4.34 /_	-83.9 =	1.025 +j	-9.6051

- Circuit Summary -

Year = 0  
 Hour = 24  
 Max pu. voltage = 1.0404  
 Min pu. voltage = 0.85991  
 Total Active Power: 0.39271 MW  
 Total Reactive Power: 0.180286 Mvar  
 Frequency = 60 Hz  
 Mode = Daily  
 Control Mode = STATIC  
 Load Model = PowerFlow  
 -----

b5710136-tr0798_75t	0.228	1.039	2.066E-005	0.009061	4.772E-009	2.093E-006
b5710137-tr0798_75t	0.228	1.039	2.066E-005	0.009061	4.772E-009	2.093E-006
b5709431-tr0798_75t	0.228	1.039	2.066E-005	0.009061	4.772E-009	2.093E-006
b5709430-tr0798_75t	0.228	1.039	2.066E-005	0.009061	4.771E-009	2.093E-006

Power Delivery Elements

Bus	Phase	Magnitude, A	Angle	(Real)	+j (Imag)
-----	-------	--------------	-------	--------	-----------

ELEMENT = "Vsource.SOURCE"

M5710715-1004	1	7.2 /_	154.3 =	-16.9 +j	8.1465
M5710715-1004	2	7.12 /_	33.4 =	14.33 +j	9.4657
M5710715-1004	3	7.31 /_	-81.7 =	2.5706 +j	-17.613