

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CAMPUS ARARANGUÁ  
CENTRO DE CIÊNCIAS, TECNOLOGIAS E SAÚDE  
DEPARTAMENTO DE ENERGIA E SUSTENTABILIDADE  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ENERGIA

Gabriel Guimarães

**ANÁLISE DO IMPACTO DOS VEÍCULOS ELÉTRICOS NO SISTEMA DE  
ENERGIA ELÉTRICA, CONSIDERANDO UM MODELO DE INJEÇÃO DE  
POTÊNCIA ATIVA**

Engenha de Energia

2022

Gabriel Guimarães

**ANÁLISE DO IMPACTO DOS VEÍCULOS ELÉTRICOS NO SISTEMA DE  
ENERGIA ELÉTRICA, CONSIDERANDO UM MODELO DE INJEÇÃO DE  
POTÊNCIA ATIVA**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao curso de graduação em Engenharia de Energia do Centro de Ciências, Tecnologias e Saúde da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro(a) de Energia.

Orientador(a): Prof. Leonardo Elizeire  
Bremermann, Dr.

Araranguá

2022

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do programa de geração automática da biblioteca universitária da UFSC.

Guimarães, Gabriel

ANÁLISE DO IMPACTO DOS VEÍCULOS ELÉTRICOS NO SISTEMA DE ENERGIA ELÉTRICA, CONSIDERANDO UM MODELO DE INJEÇÃO DE POTÊNCIA ATIVA / Gabriel Guimarães ; orientador, Leonardo Elizeire Bremermann, 2022.

61 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -  
Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Araranguá,  
Graduação em Engenharia de Energia, Araranguá, 2022.

Inclui referências.

1. Engenharia de Energia. 2. Veículos elétricos. 3. Sistema elétrico de potência. I. Elizeire Bremermann, Leonardo. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia de Energia. III. Título.

Gabriel Guimarães

Gabriel Guimarães

**ANÁLISE DO IMPACTO DOS VEÍCULOS ELÉTRICOS NO SISTEMA DE  
ENERGIA ELÉTRICA, CONSIDERANDO UM MODELO DE INJEÇÃO DE  
POTÊNCIA ATIVA**

O presente Trabalho de Conclusão de Curso, do Curso de Engenharia de Energia, foi avaliado e aprovado pela banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Leonardo Elizeire Bremermann, Dr (Orientador)  
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Dr. Giuliano Arns Rampinelli  
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof.(a) Maria Luísa Tonetto, Me.(a)  
Universidade Federal de Santa Catarina

Certificamos que essa é a versão original e final do trabalho que foi julgado adequado para obtenção do título de Engenheiro/a de Energia.



Documento assinado digitalmente  
Katia Cilene Rodrigues Madruga  
Data: 22/12/2022 17:32:13-0300  
CPF: \*\*\*.612.180-\*\*

Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Prof.(a) Dra. Kátia Cilene Rodrigues Madruga

Coordenação do Curso



Documento assinado digitalmente  
Leonardo Elizeire Bremermann  
Data: 22/12/2022 15:17:50-0300  
CPF: \*\*\*.997.390-\*\*

Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Prof. Leonardo Elizeire Bremermann, Dr  
Orientador

Gabriel Guimarães

Autor



Documento assinado digitalmente  
Gabriel Guimaraes  
Data: 22/12/2022 14:11:51-0300  
CPF: \*\*\*.071.709-\*\*

Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Araguari, 20 de dezembro de 2022.

## **AGRADECIMENTOS**

Gostaria de agradecer o apoio da minha família ao longo desses anos de graduação que contribuíram para eu seguir firme no sonho da graduação.

Agradecer aos bons professores que tive na graduação que agregaram com seu conhecimento e experiência no meu desenvolvimento acadêmico, incluindo principalmente o professor e orientador Leonardo Elizeire Bremermann que me deu o suporte necessário para concluir este documento.

Jamais poderia esquecer dos meus amigos de 16.1 e outros que fiz ao longo da graduação que viraram uma segunda família que compartilharam bons e maus momentos na caminhada acadêmica, mas que jamais deixaram de apoiar um ao outro nessa jornada tão difícil que é uma graduação em engenharia.

E é claro que agradeço imensamente a UFSC pelas oportunidades de aprendizagem, tanto academicamente, socialmente e principalmente por contribuir com a minha evolução como geral.

## RESUMO

A crescente populacional, atrelada aos novos hábitos de consumo de transporte levou ao aumento produção e venda dos veículos elétricos, dessa forma a partir desse crescimento dos EVs, o objetivo desta pesquisa é analisar e compreender como está caracterizado o impacto no aumento da penetração dos veículos elétricos nas redes de transmissão do sistema elétrico de potência, considerando estratégias que colaborem com os problemas usuais das redes de distribuição, fornecendo energia para o sistema como uma geração distribuída. A revisão bibliográfica traz os conceitos mais relevantes pelos autores no âmbito dos veículos elétricos e suas principais funções, transporte, carregamento e impacto de carga no sistema elétrico de potência. Por fim, será avaliado o impacto de diferentes níveis de penetração dos EVs na rede, como a geração distribuída, oriunda do armazenamento de energia das baterias dos BEVs, onde pode-se injetar potência ativa no sistema com o objetivo de suprir a demanda e mitigar os problemas de sub ou sobre tensão e carregamento das linhas de sub-transmissão e distribuição. Utilizando o software Power World por meio de um sistema teste de 12 barras, que representa um sistema típico da sub-transmissão e distribuição, considera-se a integração de veículos elétricos. Os resultados obtidos, ainda que preliminares, corroboram com o que se encontra na revisão bibliográfica: o carregamento dos veículos elétricos, se realizado de forma apropriada, pode contribuir com aspectos operacionais do sistema elétrico, mitigando falhas operacionais.

**Palavras-chave:** Veículos elétricos; Sistema elétrico de potência; Geração distribuída; Power World.

## ABSTRACT

The growing population, linked to new transport consumption habits, has led to an increase in the production and sale of electric vehicles. In the transmission networks of the electric power system, considering strategies that collaborate with the usual problems of distribution networks, supplying energy to the system as a distributed generation. The bibliographic review brings the most relevant concepts by the authors in the field of electric vehicles and their main functions, transport, charging and load impact on the electric power system. Finally, the impact of different penetration levels of EVs in the grid will be evaluated, such as distributed generation, arising from the storage of energy in the batteries of the BEVs, where active power can be injected into the system in order to supply the demand and mitigate problems of under or over voltage and loading of sub-transmission and distribution lines. Using the Power World software through a 12 bus test system, which represents a typical sub-transmission and distribution system, the integration of electric vehicles is considered. The results obtained, although preliminary, corroborate what is found in the bibliographic review: charging electric vehicles, if carried out appropriately, can contribute to operational aspects of the electrical system, mitigating operational failures.

**Keywords:** Electric vehicles; Electric power system; Distributed generation; Power World.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: matriz elétrica mundial (IEA,2022).....	16
Figura 2: Barra com geração, carga e linha de transmissão. (Borges,2005)	29
Figura 3:Ilustração do S12B com as cargas normais sem penetração de veículos elétricos. Fonte: Autor (2022).....	36
Figura 4: Ilustração do S12B com 30% de aumento das cargas. Fonte: Autor (2022).....	38
Figura 5: Ilustração do S12B com 60% de aumento das cargas. Fonte: Autor (2022).....	39
Figura 6: Ilustração do S12B com 100% de aumento das cargas. Fonte: Autor (2022).....	39
Figura 7: Perfil de tensão em p.u dos três cenários teste. Fonte: Autor (2022). .....	41
Figura 8: Perfil de carregamento das linhas nos três cenários teste. Fonte: Autor (2022). .....	42
Figura 9: Ilustração do S12B com 30% de injeção de potência oriunda dos EVs – cenário leve de carga. Fonte: Autor (2022).....	44
Figura 10: Ilustração do S12B com 60% de injeção de potência oriunda dos EVs – cenário leve de carga. Fonte: Autor (2022).....	45
Figura 11: Ilustração do S12B com 90% de injeção de potência oriunda dos EVs – cenário leve de carga. Fonte: Autor (2022).....	45
Figura 12: Perfil de tensão em p.u dos três cenários de injeção de potência – cenário leve. Fonte: Autor (2022). .....	47
Figura 13: Perfil de carregamento das linhas nos três cenários de injeção de potência – cenário leve. Fonte: Autor (2022).....	47
Figura 14: Ilustração do S12B com 30% de injeção de potência oriunda dos EVs – cenário médio de carga. Fonte: Autor (2022). .....	48
Figura 15: Ilustração do S12B com 60% de injeção de potência oriunda dos EVs – cenário médio de carga. Fonte: Autor (2022). .....	48
Figura 16: Ilustração do S12B com 90% de injeção de potência oriunda dos EVs – cenário médio de carga. Fonte: Autor (2022). .....	49
Figura 17: Perfil de tensão em p.u dos três cenários de injeção de potência – cenário médio. Fonte: Autor (2022). .....	50



Figura 18: Perfil de carregamento das linhas nos três cenários de injeção de potência – cenário médio. Fonte: Autor (2022). .....	51
Figura 19: Ilustração do S12B com 30% de injeção de potência oriunda dos EVs – cenário pesado de carga. Fonte: Autor (2022).....	52
Figura 20: Ilustração do S12B com 60% de injeção de potência oriunda dos EVs – cenário pesado de carga. Fonte: Autor (2022).....	52
Figura 21: Ilustração do S12B com 90% de injeção de potência oriunda dos EVs – cenário pesado de carga. Fonte: Autor (2022).....	53
Figura 22: Perfil de tensão em p.u dos três cenários de injeção de potência – cenário pesado. Fonte: Autor (2022). .....	54
Figura 23: Perfil de carregamento das linhas nos três cenários de injeção de potência – cenário pesado. Fonte: Autor (2022). .....	55
Figura 24: Ilustração do S12B com extrapolação de potência oriunda dos EVs – cenário pesado de carga. Fonte: Autor (2022). .....	56

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Resumo da revisão bibliográfica.....	24
--	----

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Informações sobre as barras do sistema base. Fonte: Autor (2022).	37
Tabela 2: Fluxo das linhas entre as barras para o cenário base. Fonte: Autor (2022).	37
Tabela 3: Comparação entre as tensões e cargas dos três cenários. Fonte: Autor (2022).	40
Tabela 4: Comparação da utilização das linhas de transmissão dos três cenários Fonte: Autor (2022).	40
Tabela 5: Percentual de integração dos EVs no cenário leve de carga. Fonte: Autor (2022).	42
Tabela 6: Percentual de integração dos EVs no cenário médio de carga. Fonte: Autor (2022).	43
Tabela 7: Percentual de integração dos EVs no cenário pesado de carga. Fonte: Autor (2022).	43
Tabela 8: Comparação entre as tensões e cargas dos três cenários de inserção de potência – cenário leve. Fonte: Autor (2022).	46
Tabela 9: Comparação da utilização das linhas de transmissão dos três cenários de inserção de potência – cenário leve. Fonte: Autor (2022).	46
Tabela 10: Comparação entre as tensões e cargas dos três cenários de inserção de potência – cenário médio. Fonte: Autor (2022).	49
Tabela 11: Comparação da utilização das linhas de transmissão dos três cenários de inserção de potência – cenário médio. Fonte: Autor (2022).	50
Tabela 12: Comparação entre as tensões e cargas dos três cenários de inserção de potência – cenário pesado. Fonte: Autor (2022).	53
Tabela 13: Comparação da utilização das linhas de transmissão dos três cenários de inserção de potência – cenário pesado. Fonte: Autor (2022).	54
Tabela 14: Informações sobre as barras do sistema com extrapolação de potência injetada Fonte: Autor (2022).	56
Tabela 15: Informações sobre a utilização das barras do sistema com extrapolação de potência injetada Fonte: Autor (2022).	57

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

PHEV - Plug-in Hybrid Electric Vehicle

BEV – Battery Electric vehicle

EVs – Electric vehicle

ABVE - Associação Brasileira do Veículo Elétrico

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica

GD – Geração Distribuída

V2G – Vehicle-to-Grid

EPE – Empresa de energia e pesquisa

SEP – Sistema elétrico de potência

GS – Gauss Seidel

LF – Lógica Fuzzy

CA – Corrente Alternada

EV – Escritório Verde

PQ – Barra de Carga

PV – Barra de Tensão

$V_{\theta}$  – Barra de Referência

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	15
1.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....	15
1.1.1	<b>Contexto e motivação .....</b>	<b>15</b>
1.2	OBJETIVOS GERAIS .....	18
1.2.1	<b>Objetivos Específicos .....</b>	<b>18</b>
1.3	ESTRUTURA DO DOCUMENTO .....	19
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	19
2.1	SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA (SEP) .....	19
2.2	FLUXO DE POTÊNCIA .....	20
2.2.1	<b>Gauss-Seidel .....</b>	<b>20</b>
2.2.2	<b>Newton-Raphson.....</b>	<b>21</b>
2.2.3	<b>Lógica Fuzzy.....</b>	<b>21</b>
2.2.4	<b>Métodos probabilísticos .....</b>	<b>22</b>
2.3	AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS DOS VEÍCULOS ELÉTRICOS NO SISTEMA 22	
2.4	ESTADO DA ARTE.....	23
3	METODOLOGIA .....	26
3.1	ESTRATÉGIAS DE CARREGAMENTO DOS VEÍCULOS ELÉTRICOS ....	27
3.1.1	<b>Estratégia de carregamento não controlado .....</b>	<b>27</b>
3.1.2	<b>Estratégia de carregamento controlado .....</b>	<b>27</b>
3.2	O MÉTODO DE FLUXO DE CARGA .....	28
3.2.1	<b>Equações gerais da potência.....</b>	<b>28</b>
3.3	MÉTODO DE NEWTON-RAPHSON.....	30
3.3.1	<b>Aplicação do método de newton-raphson.....</b>	<b>30</b>
3.3.1.1	<i>Subsistema um .....</i>	<i>31</i>
3.3.1.2	<i>Subsistema dois.....</i>	<i>33</i>
3.3.1.3	<i>Algoritmo de implementação do Método de Newton-Raphson .....</i>	<i>33</i>
3.4	SISTEMAS TESTE E PERFIS DE CARGA.....	34
3.5	A FERRAMENTA COMPUTACIONAL POWER WORLD .....	35
4	RESULTADOS.....	35
4.1	CENÁRIO BASE .....	35

4.2	CENÁRIO 1 – 30% DE AUMENTO DE CARGA NO SISTEMA .....	38
4.3	CENÁRIO 2 – 60% DE AUMENTO DE CARGA NO SISTEMA .....	38
4.4	CENÁRIO 3 – 100% DE AUMENTO DE CARGA NO SISTEMA .....	39
4.5	CENÁRIO 4 – IMPACTO DO CARREGAMENTO CONTROLADO DOS VEÍCULOS ELÉTRICOS NA OPERAÇÃO DA REDE .....	42
4.5.1	<b>Resultados da penetração de 30, 60 e 90% de EVs no cenário leve de carga</b>	<b>44</b>
4.5.2	<b>Resultados da penetração de 30, 60 e 90% de EVs no cenário médio de carga</b>	<b>48</b>
4.5.3	<b>Resultados da penetração de 30, 60 e 90% de EVs no cenário pesado de carga</b>	<b>51</b>
4.5.4	<b>Resultados da extrapolação de EVs no cenário pesado de carga</b> .....	<b>55</b>
5	CONCLUSÃO .....	58
5.1	TRABALHOS FUTUROS .....	58
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>59</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O presente capítulo apresenta a motivação e o contexto em que está inserido este estudo, além de descrever o objetivo do trabalho, e da estrutura do documento.

### 1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Em virtude de uma série de tendências sociais, ambientais, econômicas, políticas e tecnológicas, há uma grande tendência de muitos *veículos elétricos (Plug-in Hybrid Electric Vehicle - PHEV e Battery Electric Vehicle - BEV)*, estarem nas estradas e rodovias do mundo exigindo mais demanda do sistema de distribuição num futuro de médio e longo prazo. Em 2018, a frota global de automóveis do tipo BEV superou 3,29 milhões de unidades, número pequeno se comparado a uma frota total de veículos mundial de aproximadamente 1,400 bilhões. Entretanto houve um aumento de 69% em relação ao ano anterior de BEVs. China, Europa e Estados Unidos são os principais mercados, somando conjuntamente mais de 90% do estoque global (IEA, 2019).

O potencial impacto dos EVs no sistema de energia elétrica pode ser bem considerável a depender da estratégia de carregamento selecionada pelo usuário. Como regra geral, a menos que os ciclos de carregamento sejam controlados, cada dois EVs que carregam simultaneamente em casa podem aumentar a demanda de pico tanto quanto adicionar uma nova casa na vizinhança (DOW; et al, 2010).

Dessa forma, com o evidente crescimento das frotas de veículos elétricos ao longo dos próximos anos, estudos para compreender quais impactos serão causados aos sistemas e de que maneira eles ocorrerão, são fundamentais para os sistemas elétricos de potência estarem preparados para suprir essa nova demanda.

#### 1.1.1 Contexto e motivação

Vive-se em um momento que são necessárias muitas mudanças além da implementação de novas tecnologias para poder frear problemas como o efeito estufa devido à alta emissão de CO<sub>2</sub> além de pensar em alternativas de geração de energias renováveis a fim de suprir a escassez futura de combustíveis como o petróleo, carvão e gás.

A necessidade de diversificação das fontes de geração de energia elétrica é um dos tópicos de interesse não somente para o Brasil, mas para muitos países que tem como base o seu consumo energético em fontes não renováveis de energia, as quais, em grande parte tem sua origem em combustíveis fósseis e que causam impactos que podem ser irreversíveis para a saúde da terra e seus ecossistemas naturais. Uma das consequências diretas desta dependência fóssil mundial são as emissões dos gases do efeito estufa, que contribuem para o aquecimento global e as mudanças climáticas.

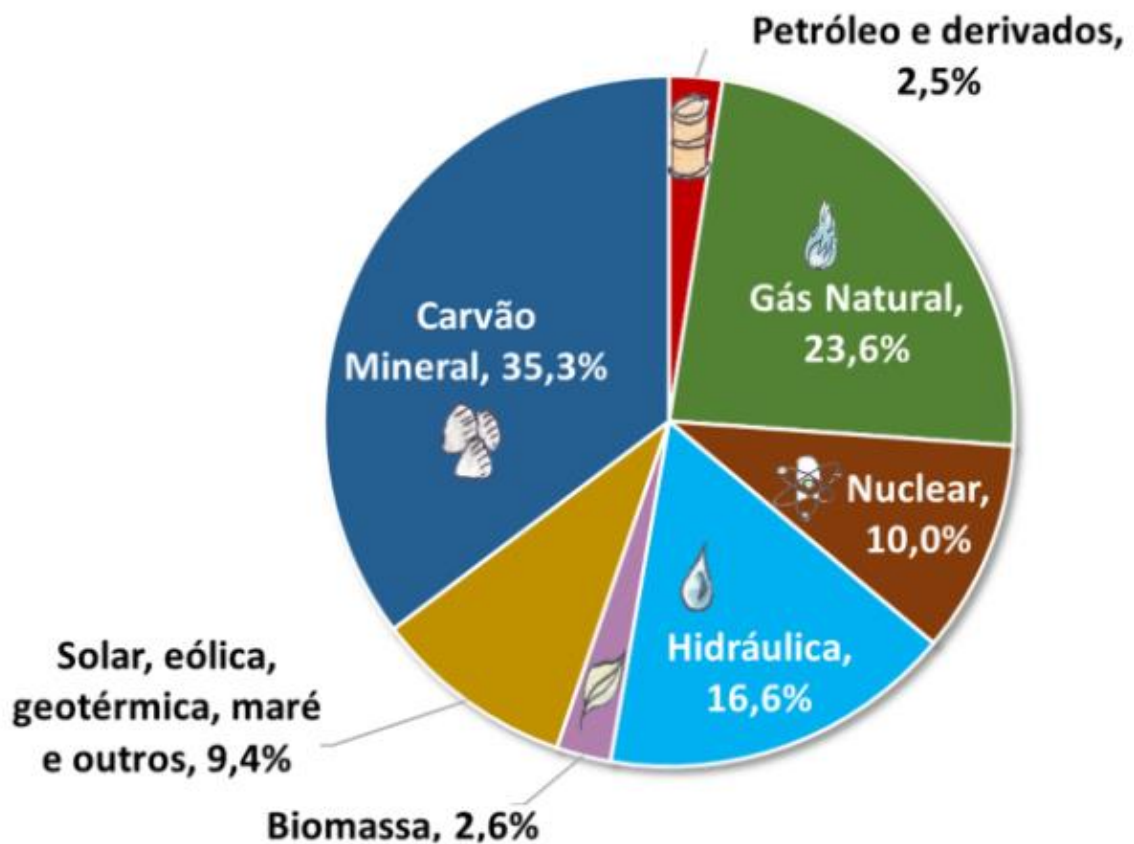


Figura 1: matriz elétrica mundial (IEA,2022).

A demanda crescente por energia devido ao crescimento populacional, o aumento do custo do processo energético desde a geração até o consumidor final, as perdas por transmissão, a crise hídrica mundial, a necessidade de utilização de fontes renováveis menos agressivas ao meio ambiente, as dificuldades de expandir o atual modelo de geração, são fatores que demonstram e comprovam a necessidade de mudanças mais ágeis para a diversificação das matrizes de geração de energia elétrica no mundo e no Brasil (CASAGRANDE; URBANETZ; et al. 2019).



Dessa maneira o declínio dos veículos com motores à combustão é motivado por fatores como, por exemplo, o aumento da poluição nas cidades e centros urbanos, acarretando imensos prejuízos ao meio ambiente, e à saúde da população, como as mudanças climáticas, o aquecimento global e doenças respiratórias (ABVE, 2013). Devido à crescente demanda por políticas públicas para reduzir as emissões de gases de efeito estufa, diversas empresas automotivas estão adotando tecnologias mais sustentáveis, como os EVs. Várias empresas vêm há anos lançando EVs nas suas linhas de produção e se expandindo no crescente mercado.

Com anos de investimento no mercado de produção de EVs era inevitável o aumento da utilização deles pelos países. Segundo dados da Associação Brasileira do Veículo Elétrico (ABVE) em 2021 no Brasil, o mercado de automóveis e comerciais leves eletrificados registrou o melhor resultado da série histórica, com o recorde absoluto de 34.990 unidades. Houve um aumento de 77% sobre os 19.745 emplacamentos de 2020 e de 195% sobre os 11.858 de 2019. Com esses números, o Brasil chega a uma frota eletrificada total em circulação de 77.259 automóveis e comerciais leves.

Outro destaque foi o crescimento expressivo dos veículos 100% elétricos (BEV), que fecharam o ano com 2.851 unidades vendidas – mais do que o triplo de 2020 (801). Entretanto mesmo com todo esse crescimento ainda esbarramos em problemas como o custo desses veículos, com infraestrutura privada e pública de recarga e principalmente com a infraestrutura do sistema elétrico.

Sabe-se que a distribuição de energia elétrica se caracteriza como o segmento do setor elétrico responsável pela entrega de energia elétrica para os usuários finais. Uma vez que o fornecimento de energia elétrica deve ser realizado de maneira eficiente, tanto do ponto de vista técnico como econômico, um dos aspectos considerados na avaliação desse serviço é a continuidade do fornecimento, a qual deve ocorrer dentro de limites operacionais regulamentados pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Devido a isso é necessário um estudo mais profundo do comportamento do fluxo de carga nos sistemas elétricos de potência, onde dessa forma pode-se detectar e prevenir problemas futuros.

Uma das principais preocupações das concessionárias de energia elétrica é como os circuitos de distribuição locais responderão ao aumento das demandas de carga apresentadas por múltiplas cargas de EVs nas instalações dos proprietários ou

em postos de carregamento. Com o aumento das cargas na rede, se faz necessário encontrar uma maneira de suprir esse aumento de demanda energética, e isso se pode dar pela utilização de geração distribuída (GD), onde a produção de eletricidade está localizada perto da carga e frequentemente instalada no mesmo local, é capaz de resolver muitos problemas decorrentes da rápida expansão de EVs e correspondentes estações de carregamento.

Uma possibilidade é que os EVs podem atuar de maneiras distintas, de maneira benéfica para rede, muito além de apenas mais uma carga necessitando de energia. Dada a natureza e as características físicas dos EVs, a sua integração na rede é realizada ao nível da tensão de distribuição. Essa interconexão permite que cada EV seja conectado à rede para obter a energia necessária para carregar a bateria. Os EVs, quando agregados em números consideráveis, constituem uma nova carga que o sistema elétrico deve fornecer. No entanto, um EV pode ser muito mais do que apenas uma simples carga, uma vez que as transferências de energia bidirecionais são possíveis além da interconexão que pode ser implementada. Com efeito, a integração permite a implantação de EVs como um recurso de geração, bem como um dispositivo de armazenamento por determinados períodos de tempo, assim tornando essa implantação uma grande ajuda o operador da rede manter operações confiáveis de uma maneira mais econômica (GUILLE; GROSS, 2009).

## 1.2 OBJETIVOS GERAIS

Tem-se como objetivo geral desta dissertação avaliar os impactos que pequenos e altos níveis de penetração de veículos elétricos causam na rede, considerando os problemas de sub e sobre tensão e de carregamento das linhas causados devido ao aumento da demanda do sistema.

### 1.2.1 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos do trabalho podem ser descritos nos seguintes tópicos:

- Definir a estratégia de suporte dos veículos elétricos ao sistema, considerando a revisão bibliográfica.

- Construir cenários de aumento de carga e de inclusão de veículos elétricos para realizar as simulações de análise em regime permanente.

### 1.3 ESTRUTURA DO DOCUMENTO

**Capítulo 1:** Neste capítulo apresentam-se as considerações iniciais relativas ao contexto, além de objetivos gerais e específicos.

**Capítulo 2:** Este capítulo apresenta conceitos, fundamentos e discussões, abordando tópicos necessários para a compreensão do trabalho.

**Capítulo 3:** Neste capítulo descreve-se a metodologia e modelos dos elementos do sistema de distribuição para avaliar os impactos da penetração dos EVs.

**Capítulo 4:** Descreve-se o estudo de caso e os resultados.

**Capítulo 5:** Apresenta as conclusões da dissertação.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo tem como objetivo apresentar conceitos, fundamentos e discussões com a fim de abordar tópicos necessários para a compreensão do trabalho. A primeira seção 2.1 demonstra os segmentos que compõem o sistema elétrico de potência. Em 2.2 é contextualizado o fluxo de potência e algumas metodologias para o cálculo do fluxo de carga. Posteriormente na seção 2.3 são relatados alguns dos impactos que os EVs podem causar aos sistemas.

### 2.1 SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA (SEP)

O sistema elétrico de potência consiste em três divisões principais: as centrais geradoras, as linhas de transmissão, e os sistemas de distribuição (STEVENSON, 1994), tendo como principal função o fornecimento de potência ativa e reativa necessária às diversas cargas conectadas a este sistema. As centrais geradoras têm como responsabilidade a conversão de energia elétrica, sendo esta proveniente de diversas fontes de energia como: energia potencial (Hídricas), energia cinética (Aerogeradores), energia térmica (Termoelétricas), entre outras.

Já as linhas de transmissão promovem a ligação entre as centrais geradoras e os sistemas de distribuição, sendo assim essenciais para as interconexões existentes

entre diferentes SEP. O sistema de distribuição realiza a ligação entre cargas individuais às linhas de transmissão nas subestações, responsáveis por realizar transformações de tensão (SOUSA, 2020).

## 2.2 FLUXO DE POTÊNCIA

O mais importante modo de funcionamento do sistema é o regime permanente simétrico, que é o estado normal de funcionamento (ELGERD, 1925). O estado de regime permanente é atingido quando as grandezas de tensões e correntes do sistema puderem ser descritas por funções senoidais, na mesma frequência de excitação, sendo, em geral, tal estado atingido após um tempo suficiente para a passagem das respostas transitórias do sistema (SOUSA, 2020).

Os estudos de fluxo de potência possuem são fundano planejamento e elaboração de projetos para expansão de sistemas de potência, assim como na determinação da melhor forma de operação dos sistemas já existentes (GRAINGER; STEVENSON, 1994).

Esses estudos consistem basicamente na determinação do estado de operação da rede para uma determinada condição de carga. Os principais dados obtidos correspondem aos valores de magnitude de tensão e ângulo de fase de cada barra que compõem o sistema, sendo este em condição de regime permanente. Em termos de estado de operação, também são determinados os fluxos de potência ativa e reativa através dos ramos do sistema, bem como as potências ativas e reativas geradas, consumidas e perdidas nos diversos elementos que constituem o sistema (SOUSA, 2020).

Ao longo dos anos os sistemas de fluxo de potência foram se desenvolvendo e se tornando mais complexos. Assim, muitas metodologias foram desenvolvidas para poder resolver os problemas do fluxo de carga. Dessa maneira são descritos rapidamente alguns métodos.

### 2.2.1 Gauss-Seidel

É um dos métodos iterativos mais simples e elementares em estudos de fluxo de potência desde os primeiros dias da análise digital de potência. Por causa de sua simplicidade, o método GS tem um valor de tutorial definido, especialmente para os

iniciantes. O método GS pode ser convenientemente usado para estudos de fluxo de carga em pequenos sistemas de energia. O método GS pode ser usado até mesmo para sistemas grandes para obter a primeira solução aproximada, que pode então ser usada como “solução inicial” para o método de Newton-Raphson. (CHATTERJEE; MANDAL, 2017).

### **2.2.2 Newton-Raphson**

O problema de fluxo de energia CA pode ser resolvido de forma eficiente pelo método de Newton. Apenas cinco iterações, cada uma equivalente a cerca de sete iterações do método Gauss-Seidel amplamente utilizado. A memória dependente do problema e requisitos de tempo variam aproximadamente em proporção direta ao tamanho do problema (TINNEY; HART, 1967).

O método de Newton Raphson é o mais robusto, mas não é rápido o suficiente para sistemas grandes porque a matriz Jacobiana deve ser recalculada a cada iteração (LI; ZHAO; LUH, 2009). Entretanto foi o método utilizado neste estudo para as simulações feitas pela sua característica já mencionada de robustez e precisão nos resultados, que é o mais importante para as simulações feitas futuramente.

### **2.2.3 Lógica Fuzzy**

A complexidade da análise do fluxo de carga com um sistema grande deu início às necessidades da abordagem de visualização humana para reduzir a complexidade da análise do fluxo de energia. Um dos métodos de controle inteligente mais poderosos, a lógica Fuzzy, é aplicada para desenvolver um modelo simples para análise de fluxo de carga (BURAGOHAIN; BORUAH, 2017).

A lógica fuzzy é uma lógica que lida com valores imprecisos que se encontram entre  $[0,1]$ . O número real que é mais verdadeiro está mais próximo de 1 e mais próximo de 0 se for menos verdadeiro (BURAGOHAIN; BORUAH, 2017).

A LF é aplicada para os problemas do sistema de potência, como aplicação na previsão de carga, controle do sistema, avaliação da segurança, planejamento do sistema e estabilidade do sistema de potência (DIXIT; et al, 2006).

Percebe-se em estudos sobre o fluxo de potência que a LF necessita de mais iterações que o método desacoplado rápido, por exemplo, entretanto sua velocidade computacional é mais rápida.

#### **2.2.4 Métodos probabilísticos**

Um planejamento e operação precisos do sistema de energia requerem um modelo de carga preciso que leve em consideração a natureza estocástica da carga. Além disso, o fluxo de potência probabilístico é uma ferramenta vital para engenheiros de sistemas de potência. Assim, um novo modelo de carga probabilística que modela a carga com uma curva de carga média, além de um erro probabilístico em torno deste valor médio é um método interessante. Os testes de qualidade de ajuste são usados para encontrar o melhor ajuste para modelar esse erro. Um algoritmo de fluxo de potência probabilístico é apresentado, onde este algoritmo emprega o modelo de carga proposto e resolve o fluxo de potência usando a técnica de varredura para frente/para trás (ANASTASIADIS; HATZIARGYRIOU, 2011).

### **2.3 AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS DOS VEÍCULOS ELÉTRICOS NO SISTEMA**

O sistema de energia opera com muitas incertezas, como as variações de carga. A avaliação dos impactos das incertezas na operação do sistema de potência é de extrema importância no planejamento e operação do mesmo (ANASTASIADIS; HATZIARGYRIOU, 2011). Naturalmente, a inserção dos veículos elétricos no mercado e suas necessidades de carregamento, impactam os sistemas de potência, pois novas cargas são conectadas à rede. Com base em algumas referências, pode-se analisar os impactos que a penetração dos EVs pode causar.

Um estudo sobre a penetração dos veículos elétricos e inserção de energias renováveis na Grécia conclui que: os impactos na rede da integração dos EVs, deixa claro que se uma abordagem de carregamento “dump” (carregamento não controlado) for implementada, o sistema Helênico precisará de reforço, possivelmente com recursos de energias renováveis, a fim de reduzir as importações de energia e a diminuição das tensões (ANASTASIADIS; HATZIARGYRIOU, 2011).

Estudos, mostram resultados para vários níveis de penetração de mercado de PHEV, de 0% a 100%. Dois cenários específicos de impactos de EV em função da penetração no mercado de veículos elétricos ajudam a verificar os impactos que as cargas de carregamento dos mesmos terão no sistema de distribuição de energia e as opções que as concessionárias têm com relação às possíveis estratégias para acomodá-las do ponto de vista de sistema, serviço e negócios (DOW; et al, 2010).

Os resultados da análise mostram que os impactos no sistema da concessionária podem ser esperados, mesmo em baixos níveis de penetração desses veículos, se a carga não for controlada. Alguns desses impactos são transformadores de distribuição sobrecarregados, linhas com sobrecarga e queda de tensão. A maioria desses impactos pode ser resolvida direta ou indiretamente, controlando o tempo e a duração do carregamento do EVs (DOW; et al, 2010).

Há literaturas que citam os impactos da penetração dos EVs no desempenho de transformadores de distribuição que atendem redes residenciais. O carregamento de EV em redes residenciais de baixa tensão pode ter um impacto significativo nas perdas do transformador. Para penetrações de EV que variam entre 2 e 40%, as perdas do transformador podem aumentar para mais de 300%, o que é principalmente devido às perdas de cobre do enrolamento. Podem também ocorrer sérios problemas de sobrecarga no transformador com o aumento da demanda de EV (por exemplo, mais de 30% de penetração) coincidindo no horário de pico. Mesmo se os transformadores forem adequadamente classificados, o carregamento residencial de veículo elétrico, que deve ocorrer à noite e no final da noite, pode não permitir condições suficientes de resfriamento do transformador, o que pode afetar a vida útil do serviço (Masoum; Moses; Smedley, 2011).

## 2.4 ESTADO DA ARTE

Com base na pesquisa realizada, um quadro com os resumos das bibliografias que formam o nosso estado da arte, foi construído a fim de deixar as referências um pouco mais claras para o leitor. O quadro é organizado da seguinte maneira: número da referência, sua proposta, método e objetivo.

Quadro 1: Resumo da revisão bibliográfica.

Referências	Proposta	Método	Objetivo
1	Este trabalho aborda os veículos elétricos apenas como carga elétrica e não considera o potencial do veículo como fonte de geração. Também aborda apenas os impactos da subestação, transformador primário e de distribuição.	O método usa um algoritmo de agrupamento estatístico para identificar um conjunto de alimentadores representativos para o sistema da concessionária de energia elétrica, cada um representando um determinado subconjunto do sistema de alimentação da concessionária.	Este conjunto de alimentadores representativos é analisado em uma série de cenários de penetração no mercado de veículos elétricos de 0 a 100%, a fim de determinar os impactos esperados no carregamento, perdas, desempenho de tensão e confiabilidade.
2	O desempenho de transformadores de distribuição que atendem a diversas redes residenciais com múltiplas atividades de carregamento de Veículos Elétricos Plug-In é estudado neste artigo.	Para investigar com precisão esses problemas, um modelo detalhado é implementado para todos os transformadores de distribuição em um sistema de rede inteligente.	O modelo implementa uma representação completa do circuito equivalente do transformador considerando perdas no enrolamento e no núcleo, bem como fluxo de fuga e reatâncias de magnetização.
3	Com o aumento de penetração dos veículos elétricos no sistema é necessário rever as soluções adequadas para os problemas que vão surgir nas redes elétricas e de produção, bem como o efeito na sua operação comercial.	A análise leva em consideração os perfis de direção dos proprietários de EVs, tipo de veículo (capacidade da bateria, consumo de energia), distância percorrida, condições da estrada etc.	Neste artigo são avaliados os impactos da penetração de EVs em barras selecionados de uma rede de distribuição.
4	Neste artigo foi desenvolvida a análise de fluxo de carga utilizando lógica Fuzzy, onde primeiramente é desenvolvido o modelo matemático e em seguida é feita a implementação do modelo utilizando o sistema de barramento IEEE 9.	O modelo desenvolvido é baseado no método desacoplado rápido de análise de fluxo de carga com incompatibilidade de potência real e reativa, pois, a variável desconhecida e a magnitude da tensão e o ângulo da tensão são saídas do sistema.	Ao final, um fluxograma é desenvolvido para mostrar o cálculo detalhado do fluxo de potência passo a passo. A implementação do modelo mostra que a solução de fluxo de potência baseada em lógica fuzzy é muito mais rápida



5	O problema do fluxo de potência CA pode ser resolvido eficientemente pelo método de Newton.	Apenas cinco iterações, cada uma equivalente a cerca de sete do método de Gauss-Seidel amplamente utilizado, são necessárias para uma solução exata.	Mostrar a precisão e eficiência da utilização do método de newton-raphson.
6	Estudar de forma abrangente o impacto esperado dos PHEVs em um sistema de distribuição de energia de uma concessionária.	É estudado um conjunto de áreas de alimentação cuidadosamente selecionadas, que juntas representam cada tipo significativamente diferente de circuito e situação no sistema de utilidade.	Verificar as opções que as concessionárias têm com relação às possíveis estratégias para acomodar as cargas dos EVs do ponto de vista de sistema, serviço e negócios.
7	Um sistema fuzzy está sendo proposto neste artigo para resolver o problema de fluxo de potência sob diferentes carregamentos e sob condições de contingência.	A composição da variável de entrada para o método de fluxo de potência baseado em lógica fuzzy foi selecionada para emular o processo de solução de um fluxo de energia convencional.	Os atributos da teoria fuzzy foram explorados e implementados com sucesso neste artigo para realizar a análise do fluxo de potência em um ambiente fuzzy.
8	Neste trabalho, uma comparação operacional entre os métodos de Gauss-Seidel e Newton Raphson é apresentada usando o software de simulação MATLAB para um sistema	Seguindo os valores obtidos, destaca-se que Gauss Seidel segue a convergência linear enquanto Newton Raphson exibe a convergência quadrática.	Identificar qual dos dois métodos é mais eficiente para o sistema escolhido para estudo.
9	Neste trabalho aborda-se conceitos fundamentais para a análise de Sistemas Elétricos de Potências (SEP), como os estudos de fluxo de potência, faltas simétricas, faltas assimétricas e análise de contingência.	Para tal finalidade foi utilizado o software Power World com o objetivo de realizar simulações computacionais.	Como resultado do trabalho foi elaborado um guia prático de utilização do software, em que serão apresentados, de forma didática e detalhada, as ferramentas utilizadas para realização das simulações.

10	Este trabalho analisa dados e parâmetros da operação deste sistema fotovoltaico ao longo dos anos de 2012 a 2018, onde foi avaliada a eficiência energética, desempenho e benefícios ambientais associada ao uso de um veículo elétrico.	Será apresentada a análise do desempenho do sistema fotovoltaico conectado à rede durante o período de seis anos, para que a eletricidade excedente gerada pelo Escritório Verde (EV) possa garantir a autonomia de um automóvel elétrico popular.	Será analisada assim, a redução na emissão de gases do efeito estufa que atuam no processo de aquecimento global, uma vez que o emprego e utilização dessa energia pode garantir a geração distribuída de eletricidade.
11	O Escritório Verde (EV) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná é uma edificação sustentável que utiliza estratégias para reduzir os impactos ao meio ambiente. Uma das estratégias é a utilização do sistema fotovoltaico conectado à rede.	Por meio de medições de consumo realizadas, foi realizado um levantamento in loco dos equipamentos elétricos utilizados no EV, estimando horas de uso e a potência.	Este artigo apresenta uma comparação entre uma estimativa de consumo de energia e a geração de energia elétrica através da utilização do sistema fotovoltaico conectado à rede.
12	O artigo apresenta uma estrutura proposta para integrar efetivamente os veículos a bateria agregados na rede como recursos energéticos distribuídos para atuar como cargas controláveis para nivelar a demanda no sistema durante condições fora de pico e como um dispositivo de geração / armazenamento.	Apresenta abordagens práticas para duas etapas principais de implementação – computador/comunicação/rede de controle e programa de incentivo.	Discutir também os principais desafios de implementação da estratégia V2G – o design de um sistema de comunicação efetivo e de programas de incentivo.

### 3 METODOLOGIA

Dos modelos de veículos elétricos existentes no mercado atualmente, os quais foram citados neste trabalho já citados nesse artigo, o modelo que utilizaremos para estudo serão os BEV.

O foco será nesse modelo pois diferentemente dos PHEV que podem atuar de forma autônoma com a utilização de combustíveis fósseis, os BEVs necessitam de conexão com a rede para serem recarregados, além de possuírem maior potência nominal e, portanto, representarem maior demanda no sistema que os PHEV.

O modelo para a resolução do estudo do fluxo de carga escolhido foi o método de Newton-Raphson. Mesmo não sendo o método mais rápido, ele é o método que mais robusto e em geral utilizado para sistemas de transmissão e sub-transmissão.

### 3.1 ESTRATÉGIAS DE CARREGAMENTO DOS VEÍCULOS ELÉTRICOS

A partir do referencial teórico da sessão anterior pode-se definir as estratégias de veículos elétricos basicamente em dois segmentos: sistema não controlado e sistema controlado.

#### 3.1.1 Estratégia de carregamento não controlado

Neste cenário, a concessionária não faz nenhum esforço para controlar ou influenciar o tempo e quantidade de cargas de carregamento dos EVs. Os proprietários os conectam quando eles querem, nesse cenário existe a modalidade:

- Dump charging: nesse caso, os EVs começam a carregar assim que são conectados no ponto de carregamento. O tempo de conexão não tem um valor específico, pois depende da necessidade que a bateria estará necessitando no momento do carregamento.

#### 3.1.2 Estratégia de carregamento controlado

Ao optar por esta estratégia a concessionária tem sucesso em seus esforços envolvendo controle de carga, preços ou incentivos de serviço na medida necessária para minimizar capacidade e confiabilidade dos impactos no sistema. Isto significa que as cargas EVs são controladas ou influenciadas para minimizar aumentos anuais de pico de carga na distribuição do equipamento. Duas modalidades se enquadram nesse sistema:

- Dual Tariff Charging: é uma forma de controle de mercado da demanda energética. Existem diferentes tarifas para promover a demanda de energia em horários diferentes. (Anastasiadis; Hatziaargyriou, 2011).

- Smart charging: esta técnica trata de carregamento controlado tecnicamente, o que requer a instalação de um controlador de veículo inteligente (em correspondência com controladores inteligentes instalados na carga e na produção de unidades) que também define o carregamento dos EVs. O carregamento segue a curva de demanda de carga e os EVs são carregados em baixas horas de demanda. Quanto menor for a carga da rede, maior será o carregamento dos EVs. Em outras palavras, este caso é o carregamento no vale. (Anastasiadis; et al, 2018).
- V2G (*Vehicle-to-grid*): esta estratégia visa a agregação de veículos elétricos com o objetivo de formar capacidade disponível significativa de armazenamento de energia elétrica para utilização durante necessidades do sistema. Todo o conceito de usar os BEVs como um recurso distribuído, dispositivo de carga e geração/armazenamento com a sua integração na rede é conhecido como o *Vehicle-to-grid* (V2G). Neste conceito, os BEVs se tornam atores ativos nas operações de rede e desempenham um papel importante na melhoria da confiabilidade, economia e atributos ambientais das operações do sistema (Guille; Gross, 2009).

## 3.2 O MÉTODO DE FLUXO DE CARGA

O mais importante modo de funcionamento do sistema elétrico é o regime permanente simétrico, que é o estado normal de funcionamento do sistema. O denominado estudo de fluxo de potência (ou fluxo de carga) é realizado considerando essa situação. Ele permite analisar as características de funcionamento global do sistema.

### 3.2.1 Equações gerais da potência

As equações gerais de potência são baseadas no modelo nodal e matriz admitância de uma barra.

Abaixo está uma barra  $k$  com a geração, carga e linha de transmissão.

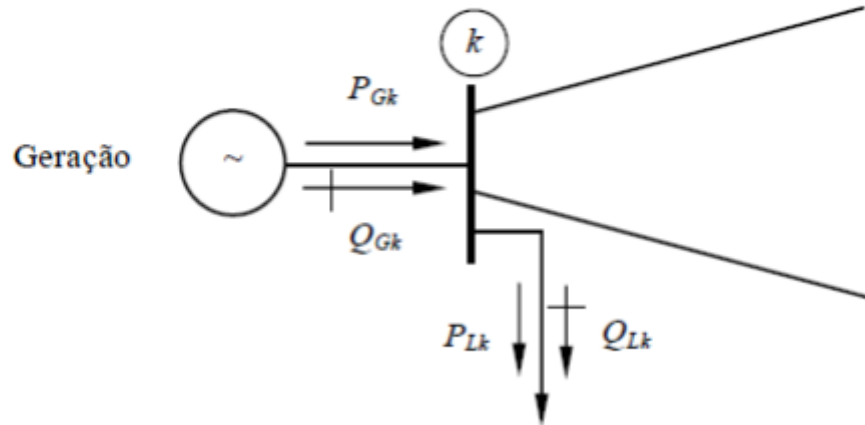


Figura 2: Barra com geração, carga e linha de transmissão. (Borges,2005)

A potência líquida para esta barra é definida por:

$$P_k = P_{Gk} - P_{Lk} \quad (1)$$

$$Q_k = Q_{Gk} - Q_{Lk} \quad (2)$$

$$S = P_k + Q_k \quad (3)$$

Considerando a injeção líquida de potência das equações 1, 2 e 3, tem-se:

$$S_k = P_k + jQ_k = V_k * I_k^* \quad (4)$$

$$I_k = Y_{BARRA} * V \quad (5)$$

Rearranjando as equações 4 e 5 e utilizando a Lei de Kirchoff, tem-se:

$$S_k = P_k + jQ_k = V_k * I_k^* = V_k * (\sum Y_{km} * V_m^*), \quad k = 1, n. \quad (6)$$

Podemos também desmembrar a equação 6 em duas equações, uma para a potência ativa e outra para reativa. A equação 7, apresenta o cálculo de potência ativa:

$$P_k = Re \{V_k * (\sum Y_{km} * V_m^*)\}, \quad k = 1, n. \quad (7)$$

Fazendo substituições e rearranjando a equação 7, tem-se:

$$P_k = V_k * [\sum V_m * \{G_{km} * \cos(\theta_{km}) + B_{km} * \text{sen}(\theta_{km})\}], k = 1, n. (8)$$

A equação 9, apresenta o cálculo da injeção de potência reativa:

$$Q_k = I_m \{V_k * (\sum Y_{km} * V_m^*)\}, k = 1, n. (9)$$

Novamente, fazendo as substituições e arranjos, tem-se:

$$Q_k = V_k * [\sum V_m * \{G_{km} * \text{sen}(\theta_{km}) - B_{km} * \cos(\theta_{km})\}], k = 1, n. (10)$$

As equações 8 e 10 apresentam o cálculo de injeção de potências ativa e reativa, considerando a matriz admitância e as tensões nodais das barras.

### 3.3 MÉTODO DE NEWTON-RAPHSON

O fluxo de carga irá tomar como base de cálculo o método de Newton-Raphson. Esse método é fundamental quando estamos diante de um conjunto de problemas distribuídos de maneiras não lineares. A função desse método é a de linearizar os problemas para que possamos encontrar as raízes da equação e obter suas soluções.

#### 3.3.1 Aplicação do método de newton-raphson

Basicamente será resolvido o problema dividindo-o em dois subsistemas, o primeiro é constituído pelas equações que serão resolvidas pelo método numérico e as respostas de sistema serão as tensões e as fases de cada barra. Já para resolver o sistema dois, utilizaremos os resultados do primeiro fazendo uma substituição das variáveis obtidas. Assim encontramos as potências ativas e reativas líquidas de cada barramento do sistema.

### 3.3.1.1 Subsistema um

Será neste subsistema que vamos aplicar o método de Newton-Raphson para o cálculo das tensões e fases. As incógnitas deste subsistema serão  $V_k$  e  $\theta_k$  para as barras do tipo  $PQ$ , e  $\theta_k$  para as barras do tipo  $PV$ . Para a utilização do método, é necessário também fazer algumas definições.  $\Delta P_k$ ,  $\Delta Q_k$ ,  $\Delta V$  e  $\Delta \theta$  são variáveis criadas para a solução do problema e  $\varepsilon_p$  é o erro aceitável na utilização do método (Monticelli, 1983).

$\Delta P_k$  e  $\Delta Q_k$  representam a diferença entre as potências especificadas e as potências calculadas, além de representar o critério de parada do método. Caso  $\Delta P_k \leq \varepsilon_p$  e  $\Delta Q_k \leq \varepsilon_p$  significa que o problema já convergiu e o método iterativo não necessita de outra interação. (Borges, 2005)

$\Delta V$  e  $\Delta \theta$  representam as variáveis onde serão incrementadas um novo resultado a cada interação.

$$\Delta P_k = P_k \text{ especificado} - P_k \text{ calculado}$$

$$\Delta Q_k = Q_k \text{ especificado} - Q_k \text{ calculado}$$

$$\Delta P_k = P_k \text{ especificado} - V_k * [\sum V_m * \{G_{km} * \cos(\theta_{km}) + B_{km} * \text{sen}(\theta_{km})\}]$$

$$\Delta Q_k = Q_k \text{ especificado} - V_k * [\sum V_m * \{G_{km} * \text{sen}(\theta_{km}) - B_{km} * \cos(\theta_{km})\}]$$

$$V_k = V_k + \Delta V$$

$$\theta_k = \theta_k + \Delta \theta$$

A partir dessas definições executamos o método seguindo os passos descritos abaixo:

- 1) Montar a matriz  $Y_{barra}$ .
- 2) Arbitrar condições iniciais para as variáveis  $V_k$  e  $\theta_k$ . Essas condições iniciais devem ser 1 e 0 respectivamente.

- 3) Substituir as condições iniciais nas expressões apresentadas do fluxo de potência.
- 4) Calcular  $\Delta P_k$  e  $\Delta Q_k$ . Verificar convergência, se  $\Delta P_k \leq \varepsilon_p$  e  $\Delta Q_k \leq \varepsilon_q$  parar. Caso contrário seguir em frente.

Primeira Interação:

- 5) Montar a matriz jacobiana  $J$ . Sendo  $n - 1$  o número de barras do sistema menos a barra de referência, e  $l$  sendo o número de barras  $PQ$ .

$$J = - \begin{bmatrix} \frac{\partial P_1}{\partial \theta_1} & \frac{\partial P_1}{\partial \theta_2} & \dots & \frac{\partial P_1}{\partial \theta_{n-1}} & \frac{\partial P_1}{\partial V_1} & \frac{\partial P_1}{\partial V_2} & \dots & \frac{\partial P_1}{\partial V_l} \\ \frac{\partial P_2}{\partial \theta_1} & \frac{\partial P_2}{\partial \theta_2} & \dots & \frac{\partial P_2}{\partial \theta_{n-1}} & \frac{\partial P_2}{\partial V_1} & \frac{\partial P_2}{\partial V_2} & \dots & \frac{\partial P_2}{\partial V_l} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial P_{n-1}}{\partial \theta_1} & \frac{\partial P_{n-1}}{\partial \theta_2} & \dots & \frac{\partial P_{n-1}}{\partial \theta_{n-1}} & \frac{\partial P_{n-1}}{\partial V_1} & \frac{\partial P_{n-1}}{\partial V_2} & \dots & \frac{\partial P_{n-1}}{\partial V_l} \\ \frac{\partial Q_1}{\partial \theta_1} & \frac{\partial Q_1}{\partial \theta_2} & \dots & \frac{\partial Q_1}{\partial \theta_{n-1}} & \frac{\partial Q_1}{\partial V_1} & \frac{\partial Q_1}{\partial V_2} & \dots & \frac{\partial Q_1}{\partial V_l} \\ \frac{\partial Q_2}{\partial \theta_1} & \frac{\partial Q_2}{\partial \theta_2} & \dots & \frac{\partial Q_2}{\partial \theta_{n-1}} & \frac{\partial Q_2}{\partial V_1} & \frac{\partial Q_2}{\partial V_2} & \dots & \frac{\partial Q_2}{\partial V_l} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial Q_l}{\partial \theta_1} & \frac{\partial Q_l}{\partial \theta_2} & \dots & \frac{\partial Q_l}{\partial \theta_{n-1}} & \frac{\partial Q_l}{\partial V_1} & \frac{\partial Q_l}{\partial V_2} & \dots & \frac{\partial Q_l}{\partial V_l} \end{bmatrix}$$

$$J = - \begin{bmatrix} H & N \\ M & L \end{bmatrix}$$

$$H_{(n-1) \times (n-1)} = \frac{\partial P}{\partial \theta}$$

$$N_{(n-1) \times l} = \frac{\partial P}{\partial V}$$

$$M_{l \times (n-1)} = \frac{\partial Q}{\partial \theta}$$

$$L_{l \times l} = \frac{\partial Q}{\partial V}$$

- 6) Solucionar o sistema linear  $\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = -J \times \begin{bmatrix} \Delta \theta_k \\ \Delta V_k \end{bmatrix}$ , que está na forma  $Ax = b$

- 7) Incrementar a solução do sistema nos valores anteriores.  $\begin{bmatrix} \theta \\ V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \theta \\ V \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix}$ .

- 8) Voltar ao passo 4.



### 3.3.1.2 Subsistema dois

Após a convergência dos valores do sistema um, temos  $V_k$  e  $\theta_k$  identificados para todas as barras do sistema, desejamos calcular  $P_k$  e  $Q_k$  para a barra de referência e  $Q_k$  para as barras do tipo PV, além dos fluxos  $P_{km}$  e  $Q_{km}$  para as linhas do problema. Por ser um sistema com equações algébricas não-lineares onde todas as incógnitas aparecem de forma explícita, torna o processo de resolução deste sistema trivial.

Abaixo segue as equações do subsistema dois:

$$P_k = V_k * [\sum V_m * \{G_{km} * \cos(\theta_{km}) + B_{km} * \text{sen}(\theta_{km})\}]$$

$$Q_k = V_k * [\sum V_m * \{G_{km} * \text{sen}(\theta_{km}) - B_{km} * \cos(\theta_{km})\}]$$

### 3.3.1.3 Algoritmo de implementação do Método de Newton-Raphson

Aqui iremos descrever de forma completa o passo a passo do algoritmo do método de Newton-Raphson que usualmente os softwares executam, baseado no livro de GRAINGER e STEVENSON.

1 – Fazer  $v = 0$  e escolher os valores iniciais dos ângulos das tensões das barras PQ e PV ( $\theta = \theta_v = \theta_0$ ) e as magnitudes das tensões das barras PQ ( $V = V_v = V_0$ ).

2 – Calcular:  $P_k(V, \theta)$  para as barras PQ e PV,  $Q_k(V, \theta)$  para as barras PQ e determinar o vetor dos resíduos (“mistaches”)  $\Delta P_v$  e  $\Delta Q_v$ .

3 – Testar a convergência: se  $\Delta P_{k^v} \text{ máx} < \varepsilon_p$  e  $\Delta Q_{k^v} \text{ máx} < \varepsilon_q$ , o processo convergiu para a solução ( $V_v, \theta_v$ ); caso contrário, continuar.

4 – Calcular a matriz Jacobiana:

$$J(V^v, \theta^v) = -\left[ \frac{H(V^v, \theta^v)}{M(V^v, \theta^v)} \mid \frac{N(V^v, \theta^v)}{L(V^v, \theta^v)} \right]$$

5 – Determinar a nova solução  $(V^{v+1}, \theta^{v+1})$  onde:

$$\begin{aligned}\theta^{v+1} &= \theta^v + \Delta\theta^v \\ V^{v+1} &= V^v + \Delta V^v\end{aligned}$$

sendo,  $(\Delta V^v$  e  $\Delta\theta^v)$  obtidos com a solução do seguinte sistema linear:

$$\left[-\frac{\Delta P^v}{\Delta Q^v}\right] = \left[\frac{H(V^v, \theta^v)}{M(V^v, \theta^v)} \mid \frac{N(V^v, \theta^v)}{L(V^v, \theta^v)}\right]^v \left[\frac{\Delta\theta^v}{\Delta V^v}\right]$$

6 – Fazer  $v = v + 1$  e voltar para o passo (2).

### 3.4 SISTEMAS TESTE E PERFIS DE CARGA

A fim de analisar os impactos que os BEVs irão agregar ao sistema elétrico, iremos utilizar um S12B que representa uma rede de subtransmissão carregada e com alguns problemas comuns de se encontrar neste tipo de sistema, como por exemplo: linhas altamente carregadas e/ou sobrecarregadas em determinados períodos do dia e sub ou sobretensões. O sistema foi representado na ferramenta computacional denominada Power World.

Alguns cenários foram utilizados para a análise da penetração dos veículos elétricos, sendo um cenário base e 4 cenários com diferentes níveis de carregamento, representando carregamento leve, médio e pesado. Estes cenários são usualmente utilizados para análise de regime permanente.

- Cenário base: onde não há carregamento de EVs e dessa forma o sistema possui apenas a carga convencional.
- Cenário 1: representa o aumento de 30% da carga do sistema, se caracterizado como um aumento leve.
- Cenário 2: aumento médio da carga do sistema em 60%.

- Cenário 3: nesta terceira simulação temos um aumento de 100% da carga, se tornando um aumento crítico.
- Cenário 4: cenário onde os EVs são utilizados como fonte de energia distribuída, podendo injetar potência ativa na rede. Aqui foram simulados três valores diferentes de injeção de potência de 30%, 60% e 90% referente a carga de cada barra, para cada um dos cenários de carga no sistema: leve, médio e pesado.

Além de uma extrapolação da injeção local de potência advinda das baterias dos EVs no cenário pesado de carga.

### 3.5 A FERRAMENTA COMPUTACIONAL POWER WORLD

Como já mencionado anteriormente, o software utilizado para aplicação das análises foi o POWER WORLD, ele possibilita encontrar o fluxo de carga entre os todos os barramentos, juntamente com as características das condições das linhas de transmissão, entre outras funções.

## 4 RESULTADOS

Nesta seção, iremos revisar, de acordo com o conjunto de simulações feitas no software Power World, as condições de carregamento das linhas e barras do sistema proposto afim de comparar as diferentes condições de injeção do uso de energia elétrica da rede pelos veículos elétricos.

### 4.1 CENÁRIO BASE

Para iniciar as análises, tomou-se um S12B criado no Power World. Esse sistema foi escolhido pois mesmo que não seja um sistema real, ele consegue nos trazer resultados preliminares que compactuam com a realidade dos sistemas elétricos de potência. Na figura 3 apresenta-se um sistema tradicional, radial, de fluxo unidirecional, onde este cenário não apresenta geração distribuída ou integração de veículos elétricos na rede. As cargas são alimentadas unicamente pelo sistema elétrico de potência.

Nesta primeira condição de análise, o sistema base será composto apenas por uma fonte de potência (representando o equivalente do sistema de transmissão), que está conectado a barra de referência 650. As cargas do cenário base são representadas pela flecha com legenda escrito BASE.

Neste sistema de 12 barras, a barra 650 representa a subestação de interligação do sistema de transmissão e de distribuição e possui tensão nominal de 115/4,16 kV. Portanto, a rede primária de distribuição tem tensão nominal no nível de 4,16 kV e a rede secundária em 480 volts (representada pela barra 634). Nota-se que é um sistema fortemente carregado.

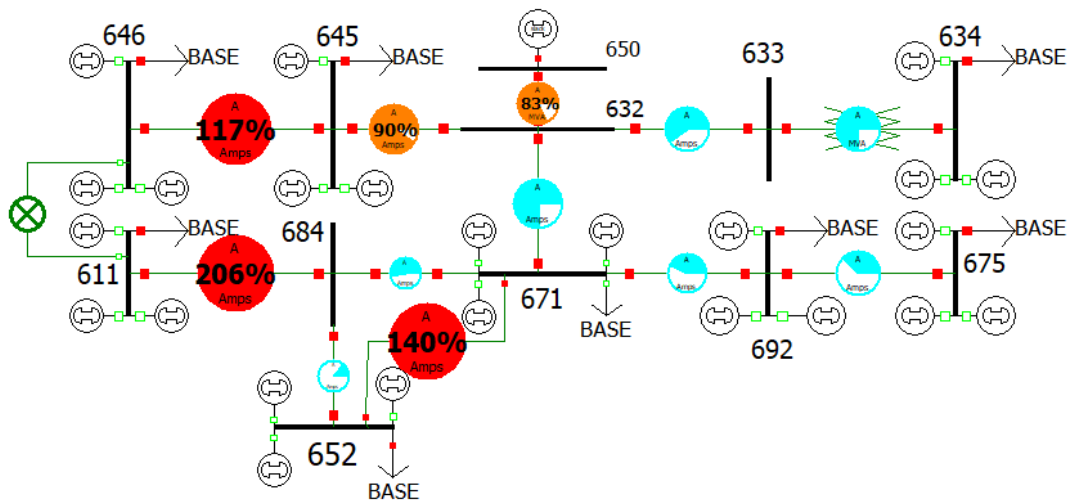


Figura 3: Ilustração do S12B com as cargas normais sem penetração de veículos elétricos. Fonte: Autor (2022).

A tabela 1 apresenta algumas informações sobre o sistema, como os módulos e fases das tensões, cargas ativas, reativas e as injeções de potências ativa e reativa nas barras.

Considerando os limites de tensão ( $0,95 pu \leq V_N \leq 1,05 pu$ ) do PRODIST (Regras e Procedimentos da Distribuição), verifica-se que o sistema não tem nenhum problema de sub ou sobretensão. Com os dados da tabela é possível distinguir as barras que possuem cargas e as que não possuem, além de que nesse cenário base apenas uma barra possui geração, que se refere a subestação.

Tabela 1: Informações sobre as barras do sistema base. Fonte: Autor (2022).

Nome	Tensão (kV)	Ângulo (°)	Tensão (PU)	Carga ativa (MW)	Carga reativa (Mvar)	Geração (MW)	Geração (Mvar)
650	115	0	1			1,85	0,44
632	4,16	-0,09	0,99947				
633	4,16	-0,09	0,99946				
634	0,48	-0,09	0,99943	0,12	0,09	0,00	0,00
645	4,16	-0,10	0,99923	0,17	0,12	0,00	0,00
646	4,16	-0,10	0,99920	0,46	0,13	0,00	0,00
671	4,16	-1,17	0,97347	0,00	0,00	0,00	0,00
692	4,16	-1,17	0,97345	0,17	0,15	0,00	0,00
675	4,16	-1,17	0,97343	0,29	0,21	0,00	0,00
684	4,16	-1,18	0,97345				
611	4,16	-1,18	0,97341	0,50	0,04	0,00	0,00
652	4,16	-1,17	0,97345	0,13	0,86	0,00	0,00

Na tabela 2, apresentam-se os resultados da simulação do caso base para os limites de carregamento da rede.

Tabela 2: Fluxo das linhas entre as barras para o cenário base. Fonte: Autor (2022).

Da barra	Para a barra	Fluxo da linha utilizado (MVA)	Limite de fluxo da linha (MVA)	Utilização (%)
650	632	1,90	2,30	82,80
632	645	0,72	0,80	90,20
632	671	1,36	1,80	75,60
632	633	0,15	0,20	75,00
633	634	0,15	0,20	75,00
645	646	0,48	0,40	119,50
646	611	0,00	0,40	0,00
671	684	0,47	0,90	52,60
671	692	0,50	1,20	41,70
692	675	0,36	0,80	44,90
684	652	0,35	0,90	38,80
684	611	0,50	0,25	200,60
652	671	0,54	0,40	135,90

Portanto, as linhas que se encontram em sobrecarga são: trecho 645-646 (em 117 %), trecho 684 – 611 (em 206 %), trecho 652 – 671 (em 140 %). Já os trechos 632 – 650 e 632 – 645 não possuem sobrecarga, mas o trecho 632 – 650 é o ramal principal (alimentador) da rede e não é adequado estar próximo da condição de sobrecarga (com carregamento de 83 %). Da mesma forma o trecho 632 – 645 que é o ramal de ligação que conduz energia elétrica para as cargas das barras 645 e 646.

A partir do cenário base, foram criados os cenários 1, 2 e 3 de aumento de carga representando três patamares de variação carga (leve, média e pesada) para a análise em regime permanente do ponto de operação do sistema.

#### 4.2 CENÁRIO 1 – 30% DE AUMENTO DE CARGA NO SISTEMA

Nesta primeira simulação, alterando as condições base de carga do sistema para 30% sem geração distribuída ou penetração dos BEVs, pode-se ter uma visualização do sistema na figura 4.

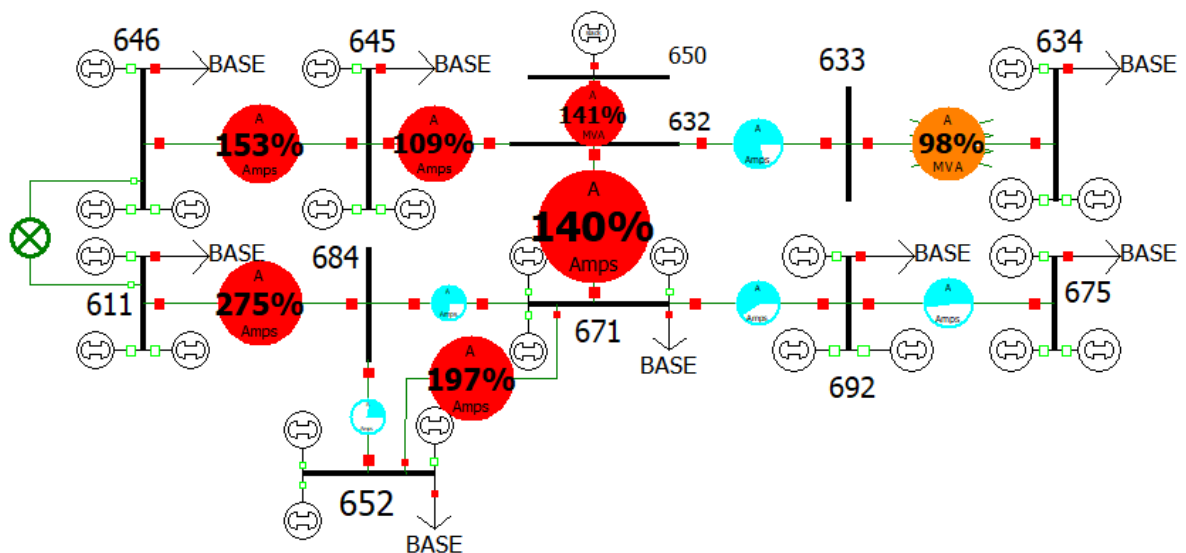


Figura 4: Ilustração do S12B com 30% de aumento das cargas. Fonte: Autor (2022).

#### 4.3 CENÁRIO 2 – 60% DE AUMENTO DE CARGA NO SISTEMA

Nesta simulação continua-se sem inserir geração distribuída ou BEVs no sistema, apenas aumentando sua carga em 60%. Na figura 5 temos a demonstração das novas condições no sistema com esse aumento médio de carga.

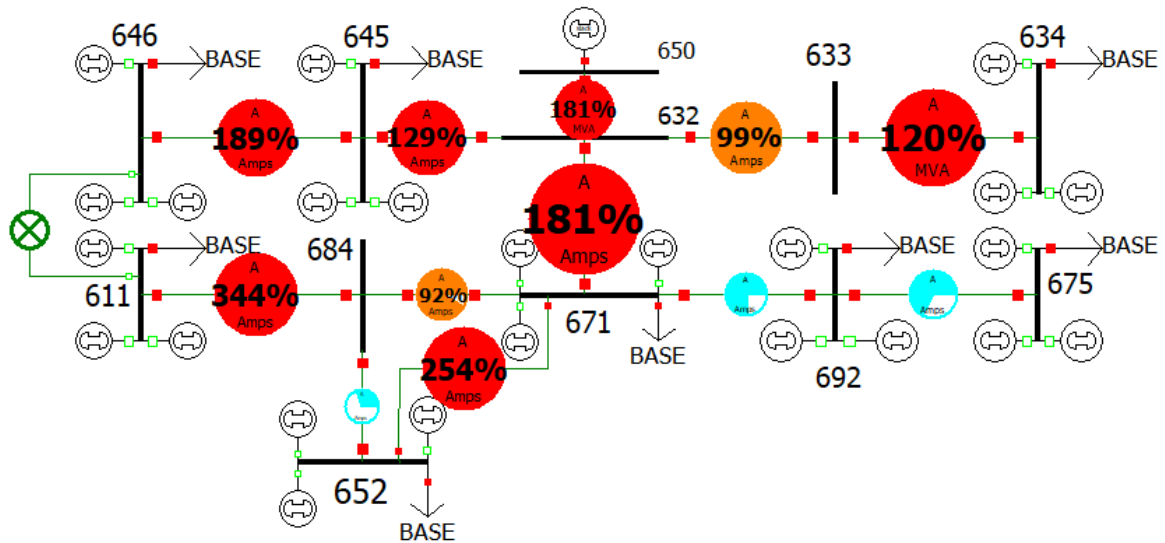


Figura 5: Ilustração do S12B com 60% de aumento das cargas. Fonte: Autor (2022).

#### 4.4 CENÁRIO 3 – 100% DE AUMENTO DE CARGA NO SISTEMA

Pode-se imaginar te antemão que nessas condições de um aumento de 100% de aumento nas cargas do sistema, o sistema ficará em condições críticas de operação. Na figura 6 pode-se visualizar novamente o sistema na condição proposta.

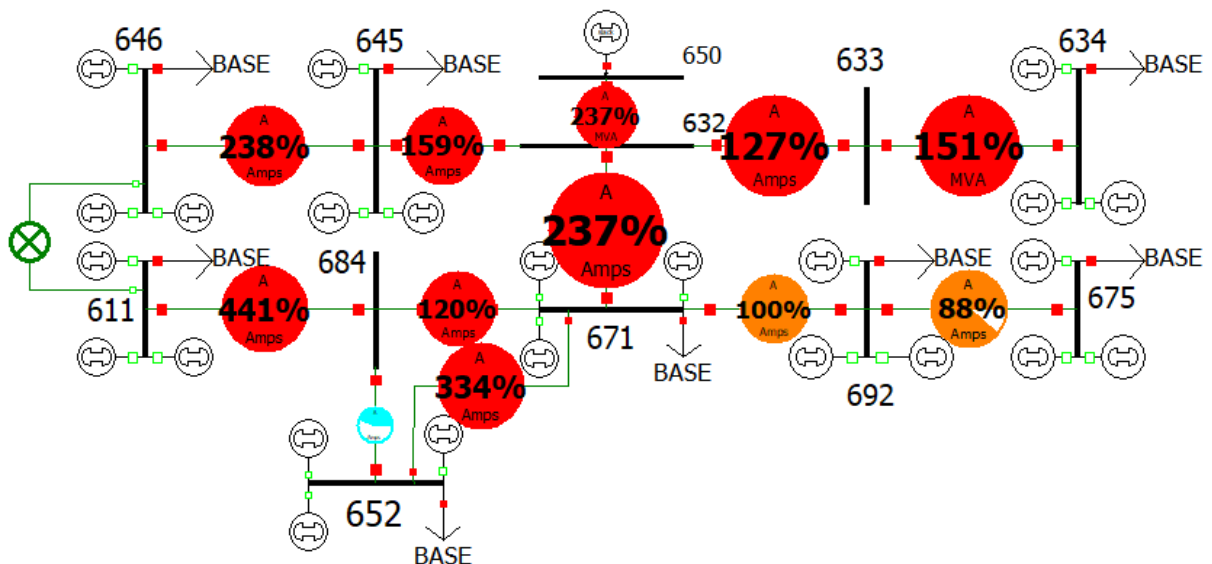


Figura 6: Ilustração do S12B com 100% de aumento das cargas. Fonte: Autor (2022).

A partir das 3 simulações geradas, pode-se fazer uma comparação entre cada condição e verificar como o sistema está se comportando. Os dados estão dispostos nas tabelas 3 e 4.

Tabela 3: Comparação entre as tensões e cargas dos três cenários. Fonte: Autor (2022).

ID	Cenário 1 (30%)				Cenário 2 (60%)				Cenário 3 (100%)			
	Tensão (PU)	Ângulo (°)	Carga ativa (MW)	Carga reativa (Mvar)	Tensão (PU)	Ângulo (°)	Carga ativa (MW)	Carga reativa (Mvar)	Tensão (PU)	Ângulo (°)	Carga ativa (MW)	Carga reativa (Mvar)
650	1,000	0,000			1,000	0,000			1,000	0,000		
632	0,999	-0,130			0,998	-0,160			0,997	-0,200		
633	0,999	-0,130			0,998	-0,160			0,997	-0,200		
634	0,999	-0,130	0,160	0,120	0,998	-0,160	0,190	0,140	0,997	-0,200	0,240	0,180
645	0,998	-0,150	0,220	0,160	0,998	-0,180	0,270	0,200	0,997	-0,220	0,340	0,250
646	0,998	-0,150	0,600	0,170	0,998	-0,180	0,740	0,210	0,997	-0,230	0,920	0,260
671	0,949	-2,070	0,500	0,290	0,933	-2,510	0,620	0,350	0,910	-3,150	0,770	0,440
692	0,949	-2,070	0,220	0,200	0,932	-2,510	0,270	0,240	0,910	-3,150	0,340	0,300
675	0,949	-2,070	0,380	0,280	0,932	-2,510	0,460	0,340	0,910	-3,150	0,580	0,420
684	0,949	-2,070			0,932	-2,510			0,910	-3,150		
611	0,949	-2,070	0,650	0,050	0,932	-2,510	0,800	0,060	0,910	-3,150	1,000	0,080
652	0,949	-2,070	0,170	1,120	0,932	-2,510	0,210	1,380	0,910	-3,150	0,260	1,720

Tabela 4: Comparação da utilização das linhas de transmissão dos três cenários Fonte: Autor (2022).

Da barra	Para a barra	Cenário 1 - 30%			Cenário 2 - 60%			Cenário 3 - 100%		
		Fluxo da linha utilizado (MVA)	Limite de fluxo da linha (MVA)	Utilização (%)	Fluxo da linha utilizado (MVA)	Limite de fluxo da linha (MVA)	Utilização (%)	Fluxo da linha utilizado (MVA)	Limite de fluxo da linha (MVA)	Utilização (%)
650	632	3,24	2,30	140,80	4,16	2,30	180,80	5,45	2,30	237,10
632	645	0,87	0,80	108,80	1,07	0,80	134,10	1,35	0,80	168,40
632	671	2,52	1,80	140,20	3,25	1,80	180,30	4,25	1,80	236,10
632	633	0,20	0,20	98,00	0,24	0,20	120,30	0,30	0,20	150,60
633	634	0,20	0,20	98,00	0,24	0,20	120,30	0,30	0,20	150,60
645	646	0,62	0,40	156,20	0,77	0,40	191,70	0,96	0,40	240,00
646	611	0,00	0,40	0,00	0,00	0,40	0,00	0,00	0,40	0,00
671	684	0,63	0,90	70,00	0,79	0,90	87,40	1,00	0,90	110,80
671	692	0,68	1,20	56,30	0,85	1,20	71,00	1,09	1,20	90,60
692	675	0,47	0,80	58,40	0,57	0,80	71,80	0,72	0,80	89,70
684	652	0,41	0,90	45,70	0,48	0,90	52,90	0,56	0,90	62,40
684	611	0,65	0,25	260,70	0,80	0,25	320,90	1,00	0,25	400,90
652	671	0,75	0,40	186,70	0,95	0,40	237,10	1,22	0,40	304,20

Pode-se observar que nos três níveis de injeção de potência ocorreu uma queda de tensão em todas as barras, tendo as maiores quedas nas barras 671, 692, 675, 684, 611 e 652 ficando com as tensões abaixo do limite estabelecido, sendo mais crítico no cenário 3, onde as barras citadas acima ficaram com as tensões em 0,91 pu.



Na comparação das linhas entre os cenários base e os outros três cenários de injeção, percebemos através dos resultados da tabela 4, que as linhas que já estavam em sobrecarga ficaram em piores condições de utilização. Referente as linhas que estavam próximas do seu limite ou até mesmo funcionando com folga, no cenário 3 tivemos todas em situação de sobrecarga, podendo se destacar que o problema na linha 632 – 650 (linha de alimentação do sistema) está ainda mais evidenciado que no cenário base, dessa forma colaborando juntamente com as outras linhas para tornar inviável o funcionamento da rede.

As figuras 7 e 8, apresentam os perfis dos comportamentos da tensão e do carregamento das linhas de acordo com a variação de carga. As simulações dos cenários 1, 2 e 3 têm como objetivo entender este comportamento sem contribuição dos veículos elétricos.

A seção 4.5, apresenta o impacto do carregamento controlado dos veículos elétricos na rede, quando utilizado para contribuir com a operação do sistema.

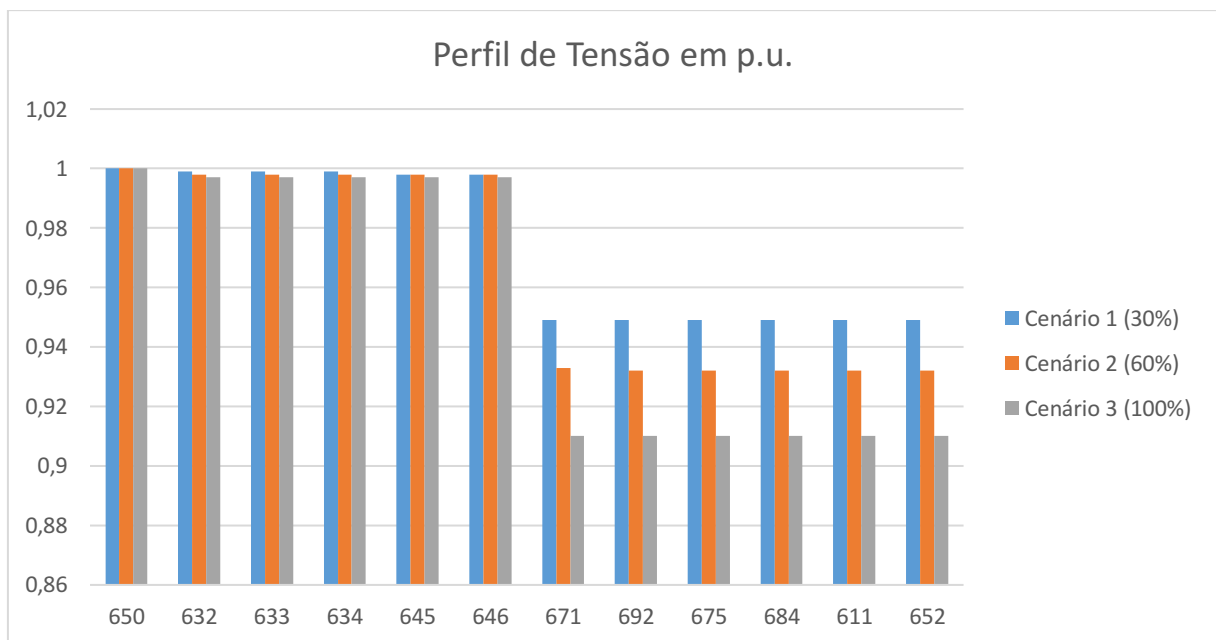


Figura 7: Perfil de tensão em p.u dos três cenários teste. Fonte: Autor (2022).

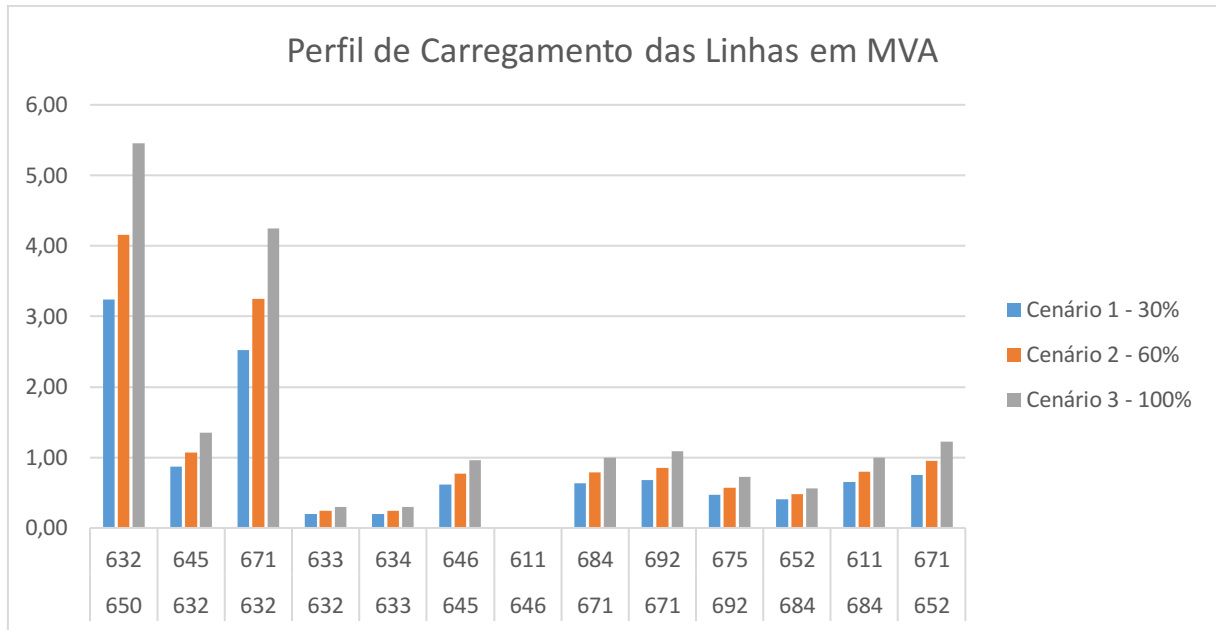


Figura 8: Perfil de carregamento das linhas nos três cenários teste. Fonte: Autor (2022).

#### 4.5 CENÁRIO 4 – IMPACTO DO CARREGAMENTO CONTROLADO DOS VEÍCULOS ELÉTRICOS NA OPERAÇÃO DA REDE

A seção 3.1.2 apresentou a estratégia de carregamento controlado dos veículos elétricos, cujo objetivo é aproveitar a possibilidade de armazenamento de energia nas baterias dos veículos para utilização, quando possível, para o benefício da operação do sistema.

A tabela 5, 6 e 7 descreve o percentual de integração de veículos (em termos de potência) referente a carga de cada barra. A integração dos veículos é testada para os três cenários de injeção de potência (leve, médio e pesado).

Tabela 5: Percentual de integração dos EVs no cenário leve de carga. Fonte: Autor (2022).

ID	Cenário 1 EV (30%) Potência Ativa disponível do carregamento controlado (MW)	Cenário 2 EV (60%) Potência Ativa disponível do carregamento controlado (MW)	Cenário 3 EV (90%) Potência Ativa disponível do carregamento controlado (MW)	Carga (MW)
650				
632				
633				
634	0,048	0,096	0,144	0,160
645	0,066	0,132	0,198	0,220
646	0,180	0,360	0,540	0,600
671	0,150	0,300	0,450	0,500

692	0,066	0,132	0,198	0,220
675	0,114	0,228	0,342	0,380
684				
611	0,195	0,390	0,585	0,650
652	0,051	0,102	0,153	0,170

Tabela 6: Percentual de integração dos EVs no cenário médio de carga. Fonte: Autor (2022).

ID	Cenário 1 EV (30%)	Cenário 2 EV (60%)	Cenário 3 EV (90%)	Carga (MW)
	Potência Ativa disponível do carregamento controlado (MW)	Potência Ativa disponível do carregamento controlado (MW)	Potência Ativa disponível do carregamento controlado (MW)	
650				
632				
633				
634	0,057	0,114	0,171	0,190
645	0,081	0,162	0,243	0,270
646	0,222	0,444	0,666	0,740
671	0,186	0,372	0,558	0,620
692	0,081	0,162	0,243	0,270
675	0,138	0,276	0,414	0,460
684				
611	0,240	0,480	0,720	0,800
652	0,063	0,126	0,189	0,210

Tabela 7: Percentual de integração dos EVs no cenário pesado de carga. Fonte: Autor (2022).

ID	Cenário 1 EV (30%)	Cenário 2 EV (60%)	Cenário 3 EV (90%)	Carga (MW)
	Potência Ativa disponível do carregamento controlado (MW)	Potência Ativa disponível do carregamento controlado (MW)	Potência Ativa disponível do carregamento controlado (MW)	
650				
632				
633				
634	0,072	0,144	0,216	0,240
645	0,102	0,204	0,306	0,340
646	0,276	0,552	0,828	0,920
671	0,231	0,462	0,693	0,770
692	0,102	0,204	0,306	0,340
675	0,174	0,348	0,522	0,580
684				
611	0,300	0,600	0,900	1,000
652	0,078	0,156	0,234	0,260

#### 4.5.1 Resultados da penetração de 30, 60 e 90% de EVs no cenário leve de carga

Na ilustração do sistema, pode-se notar que se encontram geradores em todas as barras, onde, estão dispostos para as simulações de injeção de potência.

A figura 9 representa o cenário leve com 30% de injeção de potência. Pode-se notar na imagem que o sistema melhorou, entretanto ainda não entrou em condições ideais de funcionamento.

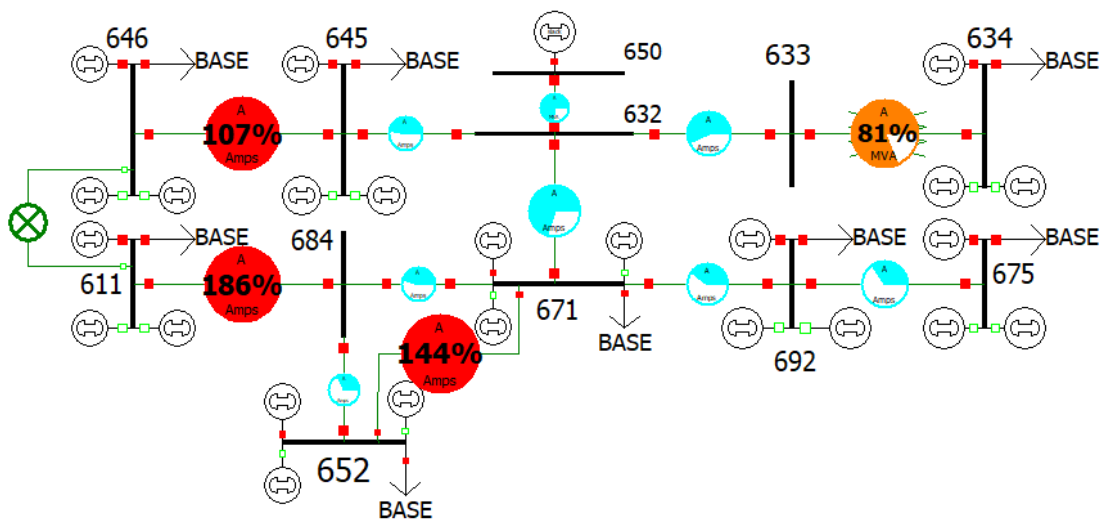


Figura 9: Ilustração do S12B com 30% de injeção de potência oriunda dos EVs – cenário leve de carga. Fonte: Autor (2022).

Observa-se que algumas linhas como as 645 - 632, 632 - 671 começaram a operar em boas condições e a linha 633 - 634 obteve uma condição menos crítica de funcionamento com a utilização das baterias do EVs injetando 30% de potência referente a carga de cada barra. Entretanto as linhas 646 - 645, 611 - 684 e 652 - 671 continuaram bem sobrecarregadas, mostrando que a injeção de potência da simulação atual não consegue levar o sistema a operar em total condição, mínima aceitável.

Na figura 10 pode-se acompanhar a melhoria do sistema com a injeção de 60% de potência oriundas dos veículos elétricos.

Nesse cenário é possível enxergar apenas a linha 611 - 684 com um cenário crítico de utilização.

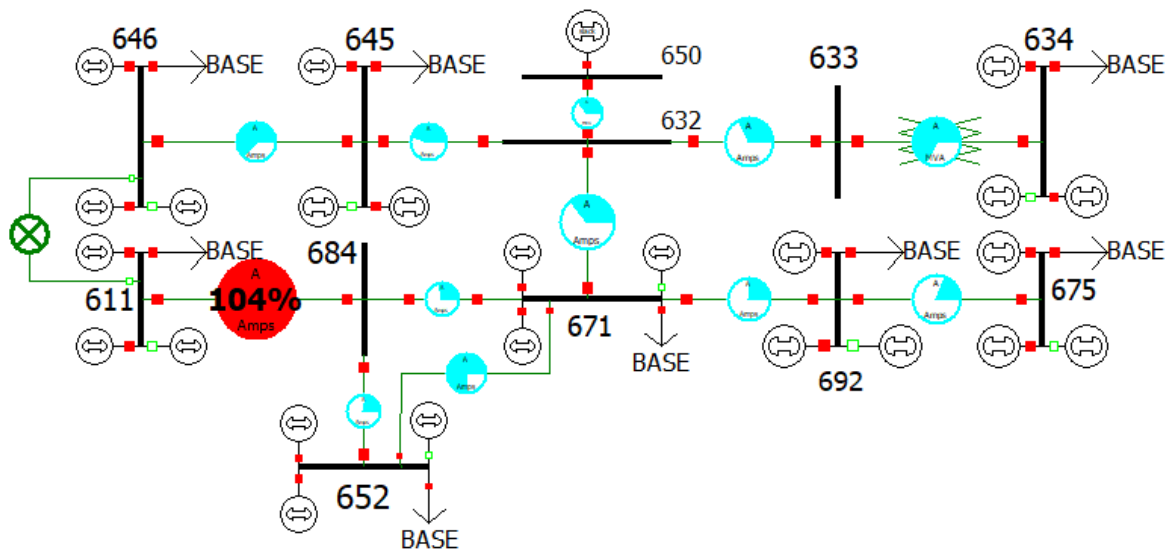


Figura 10: Ilustração do S12B com 60% de injeção de potência oriunda dos EVs – cenário leve de carga. Fonte: Autor (2022).

Com a terceira simulação para esse cenário leve de carga, foi notado que a injeção de 90% de potência contribui para todo o sistema operar em condições seguras. A figura 11 nos ajuda a visualizar o sistema operando em boas condições.

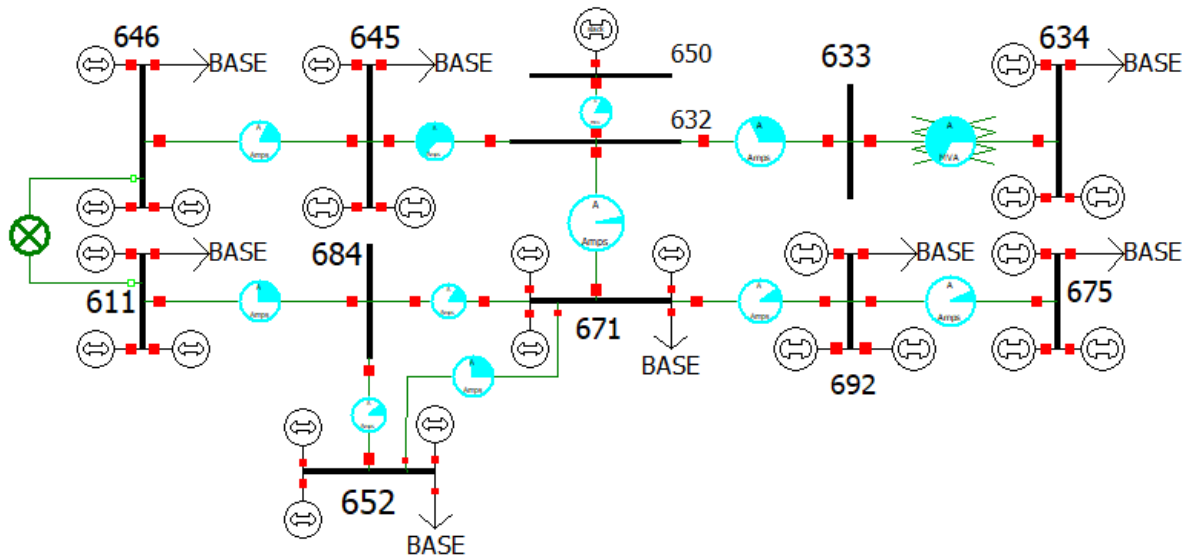


Figura 11: Ilustração do S12B com 90% de injeção de potência oriunda dos EVs – cenário leve de carga. Fonte: Autor (2022).

Com os 3 cenários de contribuição dos EVs para a demanda da rede, podemos formar as tabelas abaixo e os gráficos para contribuir com a visualização precisa da evolução e comportamento do sistema conforme foram ligadas mais cargas injetando potência.

Tabela 8: Comparação entre as tensões e cargas dos três cenários de inserção de potência – cenário leve. Fonte: Autor (2022).

ID	Cenário 1 EV (30%)				Cenário 2 EV (60%)				Cenário 3 EV (90%)			
	Tensão (PU)	Ângulo (°)	Carga ativa (MW)	Carga reativa (Mvar)	Tensão (PU)	Ângulo (°)	Carga ativa (MW)	Carga reativa (Mvar)	Tensão (PU)	Ângulo (°)	Carga ativa (MW)	Carga reativa (Mvar)
650	1,0000	0,00			1,0000	0,00			1,0000	0,00		
632	1,0004	-0,07			1,0004	-0,02			1,0003	0,01		
633	1,0004	-0,07			1,0004	-0,02			1,0003	0,01		
634	1,0004	-0,07	0,16	0,12	1,0004	-0,02	0,16	0,12	1,0003	0,01	0,16	0,12
645	1,0003	-0,08	0,07	0,16	1,0005	-0,02	0,07	0,16	1,0005	0,01	0,07	0,16
646	1,0003	-0,08	0,60	0,17	1,0005	-0,02	0,60	0,17	1,0005	0,01	0,60	0,17
671	1,0000	-1,78	0,50	0,29	1,0000	-0,86	0,50	0,29	1,0000	-0,08	0,50	0,29
692	1,0000	-1,78	0,22	0,20	1,0000	-0,86	0,22	0,20	1,0000	-0,08	0,22	0,20
675	1,0000	-1,78	0,38	0,28	1,0000	-0,86	0,38	0,28	1,0000	-0,08	0,38	0,28
684	1,0000	-1,78			1,0000	-0,86			1,0000	-0,08		
611	1,0000	-1,78	0,65	0,05	1,0000	-0,86	0,65	0,05	1,0000	-0,08	0,65	0,05
652	1,0000	-1,78	0,17	1,12	1,0000	-0,86	0,17	1,12	1,0000	-0,08	0,17	1,12

Tabela 9: Comparação da utilização das linhas de transmissão dos três cenários de inserção de potência – cenário leve. Fonte: Autor (2022).

Da barra	Para a barra	Cenário 1 EV (30%)			Cenário 2 EV (60%)			Cenário 3 EV (90%)		
		Fluxo da linha utilizado (MVA)	Limite de fluxo da linha (MVA)	Utilização (%)	Fluxo da linha utilizado (MVA)	Limite de fluxo da linha (MVA)	Utilização (%)	Fluxo da linha utilizado (MVA)	Limite de fluxo da linha (MVA)	Utilização (%)
650	632	1,65	2,30	71,80	0,71	2,30	31,10	0,43	2,30	18,60
632	645	0,37	0,80	46,10	0,39	0,80	48,80	0,50	0,80	62,60
632	671	1,27	1,80	70,40	0,62	1,80	34,40	0,06	1,80	3,50
632	633	0,16	0,20	81,00	0,12	0,20	59,00	0,13	0,20	66,70
633	634	0,16	0,20	81,00	0,12	0,20	59,00	0,13	0,20	66,70
645	646	0,44	0,40	110,90	0,27	0,40	66,70	0,11	0,40	27,10
646	611	0,00	0,40	0,00	0,00	0,40	0,00	0,00	0,40	0,00
671	684	0,40	0,90	45,00	0,25	0,90	28,00	0,14	0,90	15,60
671	692	0,48	1,20	39,70	0,26	1,20	21,70	0,12	1,20	9,90
692	675	0,35	0,80	44,30	0,23	0,80	28,90	0,16	0,80	20,20
684	652	0,29	0,90	32,50	0,19	0,90	21,00	0,17	0,90	18,90
684	611	0,46	0,25	186,00	0,26	0,25	104,20	0,07	0,25	26,20
652	671	0,63	0,40	156,40	0,34	0,40	83,90	0,14	0,40	35,70

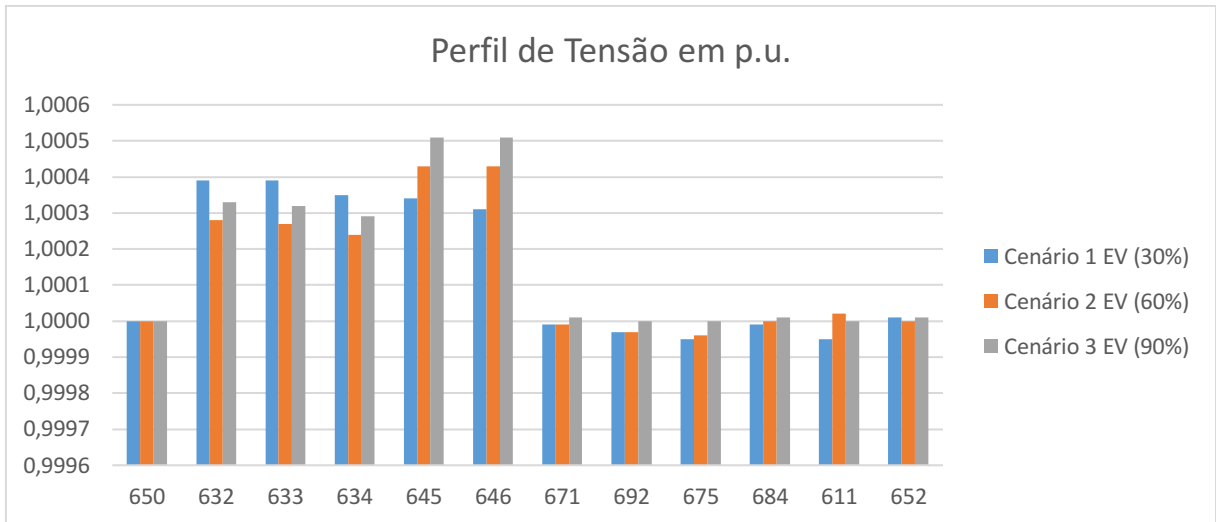


Figura 12: Perfil de tensão em p.u. dos três cenários de injeção de potência – cenário leve. Fonte: Autor (2022).

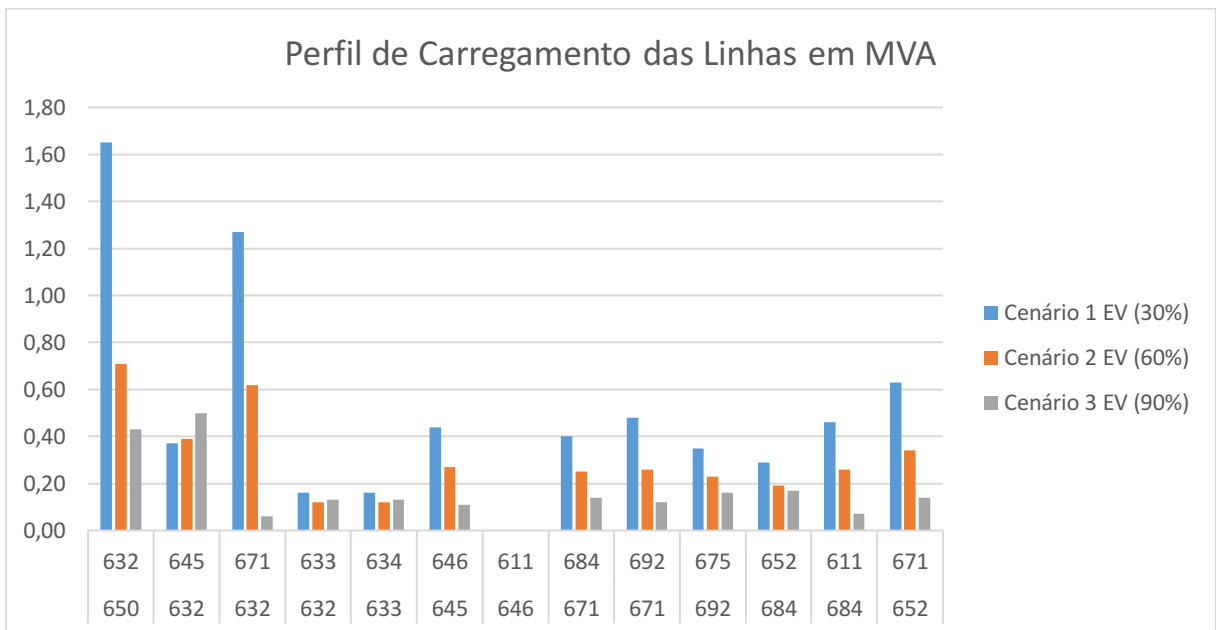


Figura 13: Perfil de carregamento das linhas nos três cenários de injeção de potência – cenário leve. Fonte: Autor (2022).

Com as informações das simulações disponíveis pode-se observar que nos três cenários as tensões ficaram dentro da faixa de segurança aceitável. A faixa de tensão dentro dos três cenários ficou entre  $1,0000 pu \leq V_N \leq 1,0005 pu$ . Em contrapartida o sistema só começou a operar em boas condições em todas as linhas no momento que os veículos elétricos contribuíram com uma injeção de 90% da carga utilizada nas barras.

#### 4.5.2 Resultados da penetração de 30, 60 e 90% de EVs no cenário médio de carga

Na figura 14 pode-se olhar o cenário médio com 30% de injeção de potência, utilizando apenas uma carga de EV no sistema. Todas as linhas que estavam em situação crítica de funcionamento, continuam no mesmo estado, mesmo que seja observada uma leve melhora nas linhas.

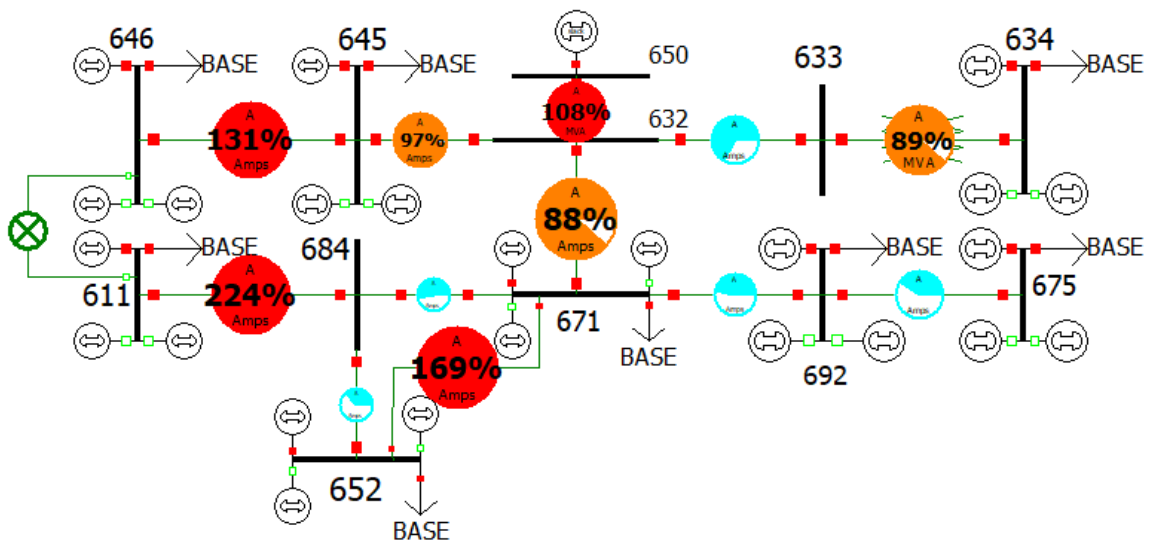


Figura 14: Ilustração do S12B com 30% de injeção de potência oriunda dos EVs – cenário médio de carga. Fonte: Autor (2022).

A figura 15 abaixo nos mostra a melhoria do sistema com a inserção de duas cargas injetando um total de 60% da potência utilizada nas barras.

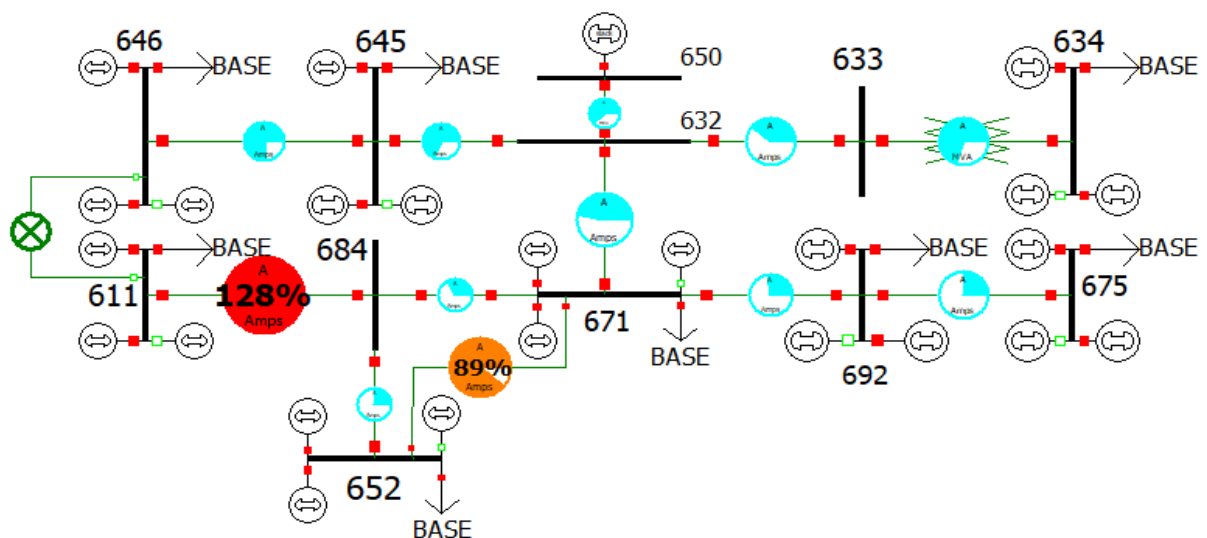


Figura 15: Ilustração do S12B com 60% de injeção de potência oriunda dos EVs – cenário médio de carga. Fonte: Autor (2022).



Analisando a imagem acima pode-se notar que com esse nível de injeção de potência, todas as linhas tiveram sua capacidade de operação melhorada, entretanto as linhas 611 - 684 e 652 - 671 continuam sobrecarregadas.

A última simulação para esse cenário médio de carga, nos mostra que os EVs contribuindo com 90% da carga das barras, é capaz de levar o sistema a operar com condições seguras em todas as linhas. A figura 16 comprova isso.

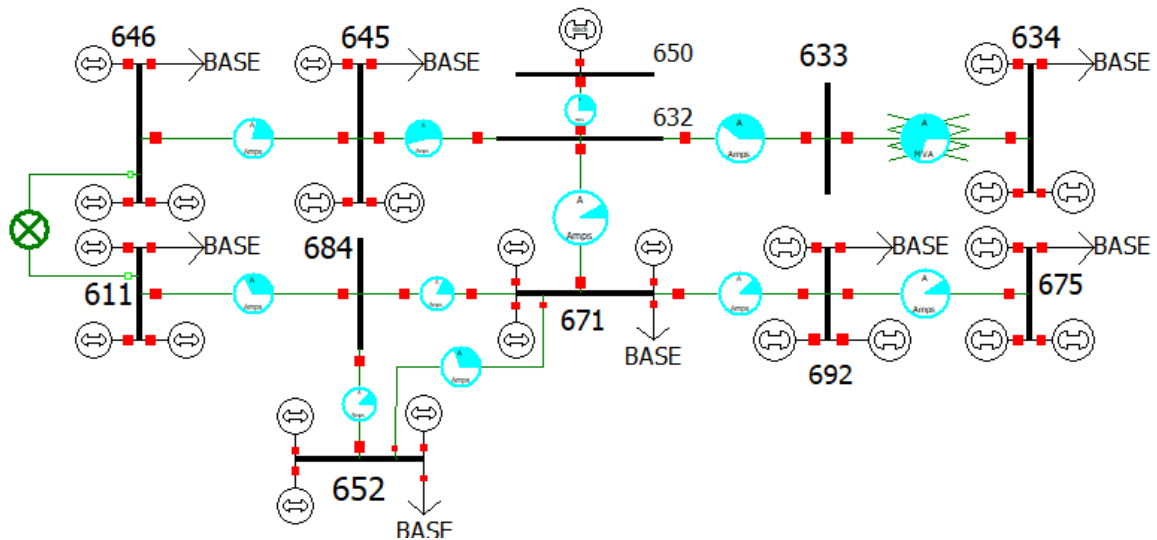


Figura 16: Ilustração do S12B com 90% de injeção de potência oriunda dos EVs – cenário médio de carga. Fonte: Autor (2022).

Novamente podemos confirmar todas as observações obtidas com as ilustrações dos sistemas analisando as comparações dos cenários nas tabelas 10 e 11 além das figuras 17 e 18.

Tabela 10: Comparação entre as tensões e cargas dos três cenários de inserção de potência – cenário médio. Fonte: Autor (2022).

ID	Cenário 1 EV (30%)				Cenário 2 EV (60%)				Cenário 3 EV (90%)			
	Tensão (PU)	Ângulo (°)	Carga ativa (MW)	Carga reativa (Mvar)	Tensão (PU)	Ângulo (°)	Carga ativa (MW)	Carga reativa (Mvar)	Tensão (PU)	Ângulo (°)	Carga ativa (MW)	Carga reativa (Mvar)
650	1,0000	0,00			1,0000	0,00			1,0000	0,00		
632	1,0004	-0,11			1,0004	-0,06			1,0003	-0,02		
633	1,0004	-0,11			1,0003	-0,06			1,0003	-0,02		
634	1,0003	-0,11	0,19	0,12	1,0003	-0,06	0,19	0,12	1,0003	-0,02	0,19	0,12
645	1,0001	-0,13	0,27	0,16	1,0002	-0,07	0,27	0,16	1,0003	-0,03	0,27	0,16
646	1,0001	-0,13	0,74	0,17	1,0002	-0,07	0,74	0,17	1,0003	-0,03	0,74	0,17
671	1,0000	-2,25	0,62	0,29	1,0000	-1,19	0,62	0,29	1,0000	-0,22	0,62	0,29

692	1,0000	-2,25	0,27	0,20	1,0000	-1,19	0,27	0,20	1,0000	-0,22	0,27	0,20
675	0,9999	-2,25	0,46	0,28	1,0000	-1,19	0,46	0,28	1,0000	-0,22	0,46	0,28
684	1,0000	-2,25			1,0000	-1,19			1,0000	-0,22		
611	0,9999	-2,26	0,80	0,05	1,0000	-1,19	0,80	0,05	1,0000	-0,22	0,80	0,05
652	1,0000	-2,26	0,21	1,12	1,0000	-1,19	0,21	1,12	1,0000	-0,22	0,21	1,12

Tabela 11: Comparação da utilização das linhas de transmissão dos três cenários de inserção de potência – cenário médio. Fonte: Autor (2022).

Da barra	Para a barra	Cenário 1 EV (30%)			Cenário 2 EV (60%)			Cenário 3 EV (90%)		
		Fluxo da linha utilizado (MVA)	Limite de fluxo da linha (MVA)	Utilização (%)	Fluxo da linha utilizado (MVA)	Limite de fluxo da linha (MVA)	Utilização (%)	Fluxo da linha utilizado (MVA)	Limite de fluxo da linha (MVA)	Utilização (%)
650	632	2,48	2,30	107,90	1,41	2,30	61,40	0,58	2,30	25,00
632	645	0,78	0,80	97,10	0,55	0,80	68,20	0,43	0,80	54,10
632	671	1,59	1,80	88,30	0,84	1,80	46,50	0,15	1,80	8,10
632	633	0,18	0,20	88,60	0,14	0,20	69,80	0,14	0,20	69,80
633	634	0,18	0,20	88,60	0,14	0,20	69,80	0,14	0,20	69,80
645	646	0,54	0,40	134,30	0,32	0,40	79,50	0,12	0,40	29,20
646	611	0,00	0,40	0,00	0,00	0,40	0,00	0,00	0,40	0,00
671	684	0,48	0,90	53,10	0,30	0,90	32,90	0,15	0,90	16,80
671	692	0,56	1,20	46,50	0,33	1,20	27,70	0,15	1,20	12,70
692	675	0,40	0,80	49,70	0,27	0,80	33,50	0,17	0,80	21,90
684	652	0,33	0,90	36,20	0,21	0,90	23,70	0,16	0,90	18,20
684	611	0,56	0,25	224,50	0,32	0,25	128,30	0,08	0,25	32,60
652	671	0,72	0,40	180,90	0,40	0,40	101,20	0,16	0,40	40,10

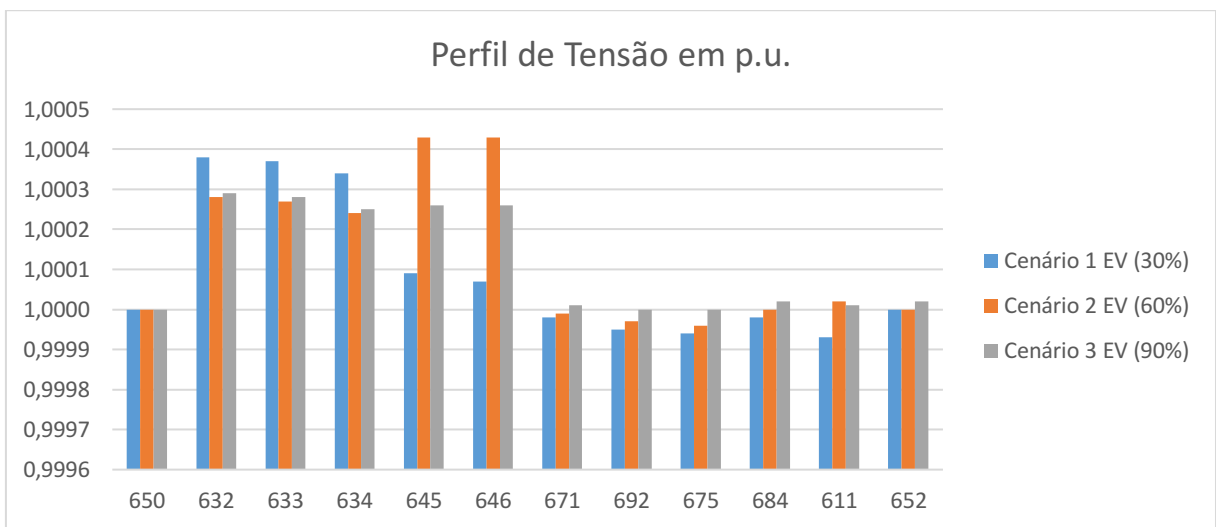


Figura 17: Perfil de tensão em p.u dos três cenários de injeção de potência – cenário médio. Fonte: Autor (2022).

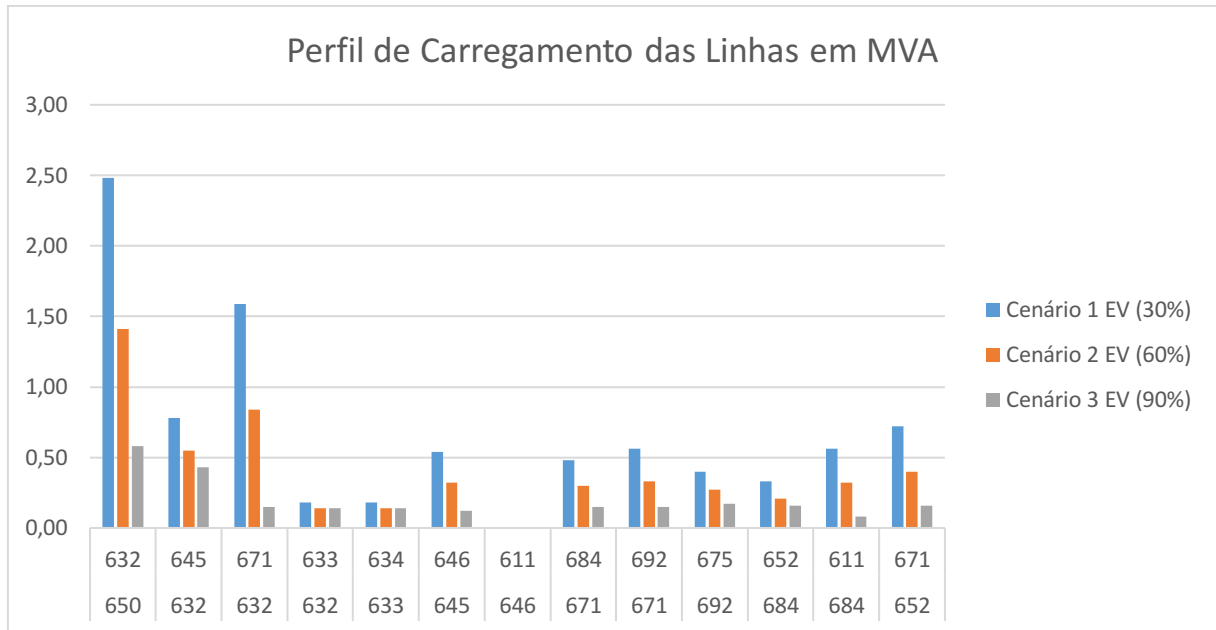


Figura 18: Perfil de carregamento das linhas nos três cenários de injeção de potência – cenário médio. Fonte: Autor (2022).

Novamente nos três cenários as tensões ficaram dentro da faixa de segurança aceitável. A faixa de tensão nos três cenários foi de  $0,9999 pu \leq V_N \leq 1,0004 pu$ .

O perfil carregamento das linhas de transmissão começou a operar em condições adequadas de funcionamento total, apenas quando foi suprida 90% da demanda das cargas com as baterias dos EVs injetando energia na rede.

#### 4.5.3 Resultados da penetração de 30, 60 e 90% de EVs no cenário pesado de carga

Nesta sessão iremos dar continuidade a mais três simulações, sendo agora dentro do cenário pesado de carga.

Nas figuras 19, 20 e 21 veremos as ilustrações do sistema operando para os três níveis de injeção de potência através das baterias dos EVs.

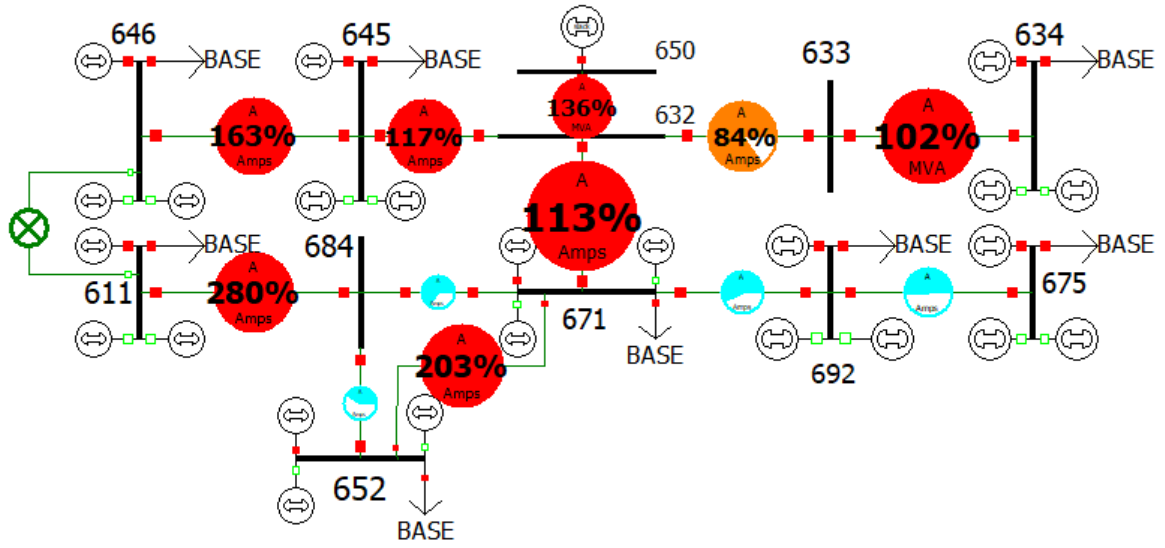


Figura 19: Ilustração do S12B com 30% de injeção de potência oriunda dos EVs – cenário pesado de carga. Fonte: Autor (2022).

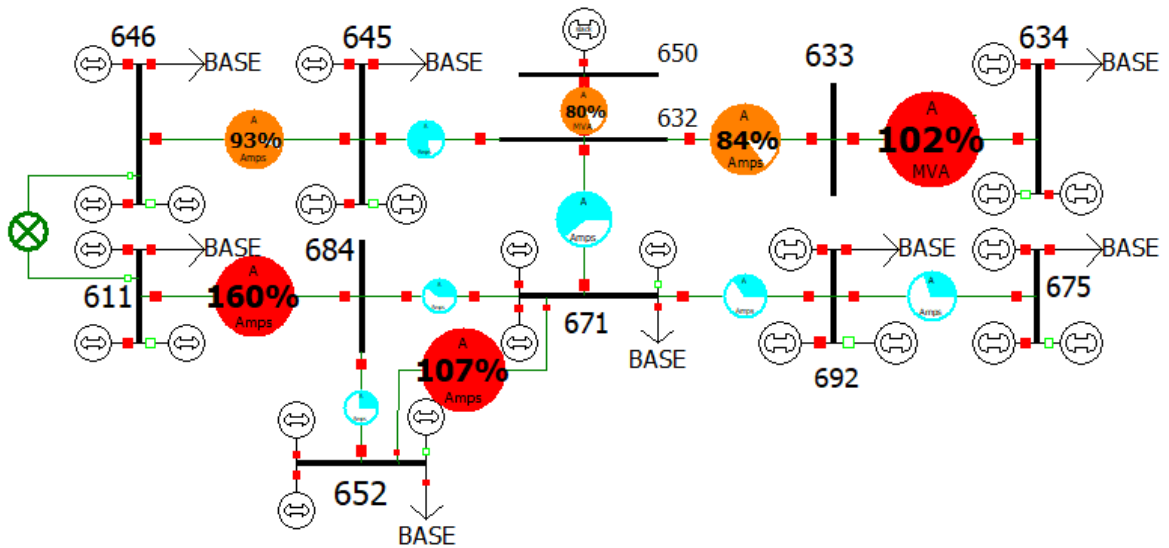


Figura 20: Ilustração do S12B com 60% de injeção de potência oriunda dos EVs – cenário pesado de carga. Fonte: Autor (2022).

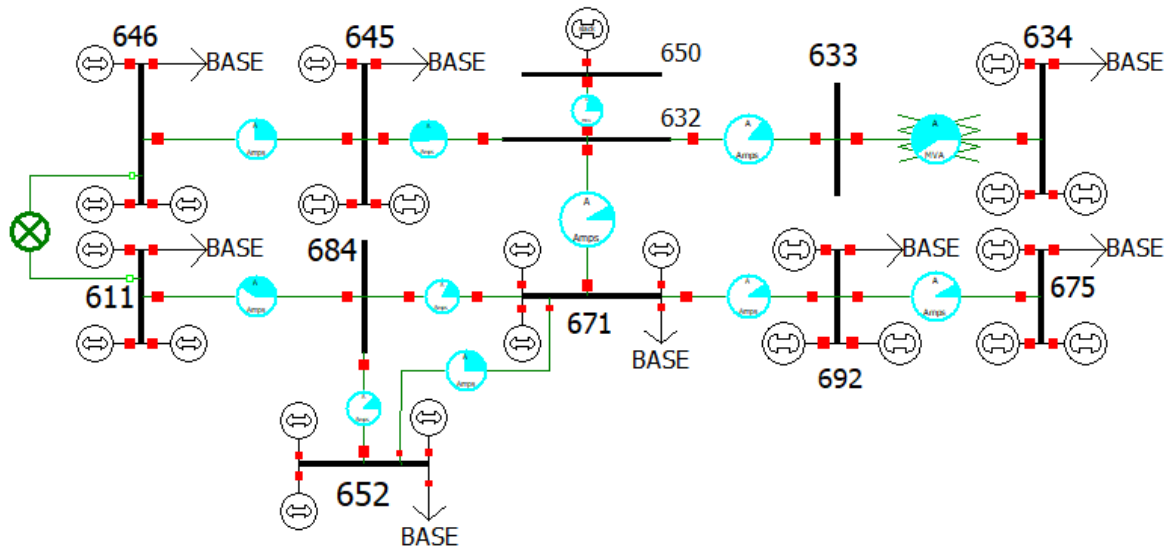


Figura 21: Ilustração do S12B com 90% de injeção de potência oriunda dos EVs – cenário pesado de carga. Fonte: Autor (2022).

Nas tabelas 12 e 13 podemos visualizar o comportamento de tensão das barras e a utilização das linhas com a contribuição dos EVs. As imagens 22 e 23 colaboram para ilustrar melhor as informações contidas nas tabelas.

Tabela 12: Comparação entre as tensões e cargas dos três cenários de inserção de potência – cenário pesado. Fonte: Autor (2022).

ID	Cenário 1 EV (30%)				Cenário 2 EV (60%)				Cenário 3 EV (90%)			
	Tensão (PU)	Ângulo (°)	Carga ativa (MW)	Carga reativa (Mvar)	Tensão (PU)	Ângulo (°)	Carga ativa (MW)	Carga reativa (Mvar)	Tensão (PU)	Ângulo (°)	Carga ativa (MW)	Carga reativa (Mvar)
650	1,0000	0,00			1,0000	0,00			1,0000	0,00		
632	1,0004	-0,14			1,0004	-0,08			1,0003	-0,02		
633	1,0004	-0,14			1,0004	-0,08			1,0003	-0,02		
634	1,0004	-0,14	0,24	0,12	1,0003	-0,08	0,24	0,12	1,0003	-0,02	0,24	0,12
645	1,0001	-0,17	0,34	0,16	1,0002	-0,10	0,34	0,16	1,0003	-0,02	0,34	0,16
646	1,0000	-0,17	0,92	0,17	1,0002	-0,10	0,92	0,17	1,0003	-0,02	0,92	0,17
671	1,0000	-2,88	0,77	0,29	1,0000	-1,56	0,77	0,29	1,0000	-0,21	0,77	0,29
692	0,9999	-2,88	0,34	0,20	1,0000	-1,56	0,34	0,20	1,0000	-0,21	0,34	0,20
675	0,9999	-2,88	0,58	0,28	1,0000	-1,56	0,58	0,28	1,0000	-0,21	0,58	0,28
684	1,0000	-2,88			1,0000	-1,56			1,0000	-0,21		
611	0,9999	-2,88	1,00	0,05	1,0000	-1,56	1,00	0,05	1,0000	-0,21	1,00	0,05
652	1,0000	-2,88	0,26	1,12	1,0000	-1,56	0,26	1,12	1,0000	-0,21	0,26	1,12

Tabela 13: Comparação da utilização das linhas de transmissão dos três cenários de inserção de potência – cenário pesado. Fonte: Autor (2022).

Da barra	Para a barra	Cenário 1 EV (30%)			Cenário 2 EV (60%)			Cenário 3 EV (90%)		
		Fluxo da linha utilizado (MVA)	Limite de fluxo da linha (MVA)	Utilização (%)	Fluxo da linha utilizado (MVA)	Limite de fluxo da linha (MVA)	Utilização (%)	Fluxo da linha utilizado (MVA)	Limite de fluxo da linha (MVA)	Utilização (%)
650	632	3,13	2,30	135,90	1,85	2,30	80,30	0,51	2,30	22,00
632	645	0,94	0,80	117,40	0,62	0,80	77,90	0,41	0,80	51,60
632	671	2,03	1,80	112,80	1,10	1,80	60,80	0,15	1,80	8,10
632	633	0,20	0,20	102,40	0,20	0,20	102,40	0,12	0,20	59,70
633	634	0,20	0,20	102,40	0,20	0,20	102,40	0,12	0,20	59,70
645	646	0,66	0,40	164,90	0,39	0,40	96,50	0,13	0,40	32,20
646	611	0,00	0,40	0,00	0,00	0,40	0,00	0,00	0,40	0,00
671	684	0,58	0,90	64,80	0,35	0,90	39,20	0,15	0,90	16,70
671	692	0,68	1,20	56,80	0,41	1,20	34,00	0,12	1,20	10,20
692	675	0,47	0,80	58,60	0,31	0,80	38,70	0,16	0,80	20,00
684	652	0,37	0,90	41,50	0,24	0,90	26,60	0,17	0,90	18,80
684	611	0,70	0,25	280,40	0,40	0,25	160,20	0,10	0,25	40,00
652	671	0,86	0,40	215,70	0,48	0,40	119,90	0,15	0,40	36,70

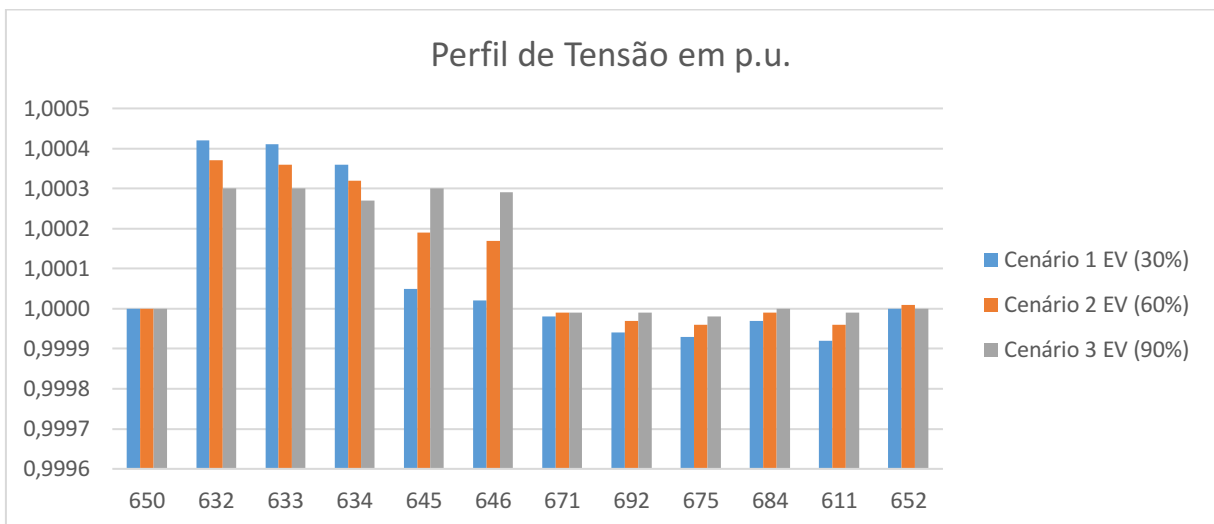


Figura 22: Perfil de tensão em p.u dos três cenários de injeção de potência – cenário pesado. Fonte: Autor (2022).

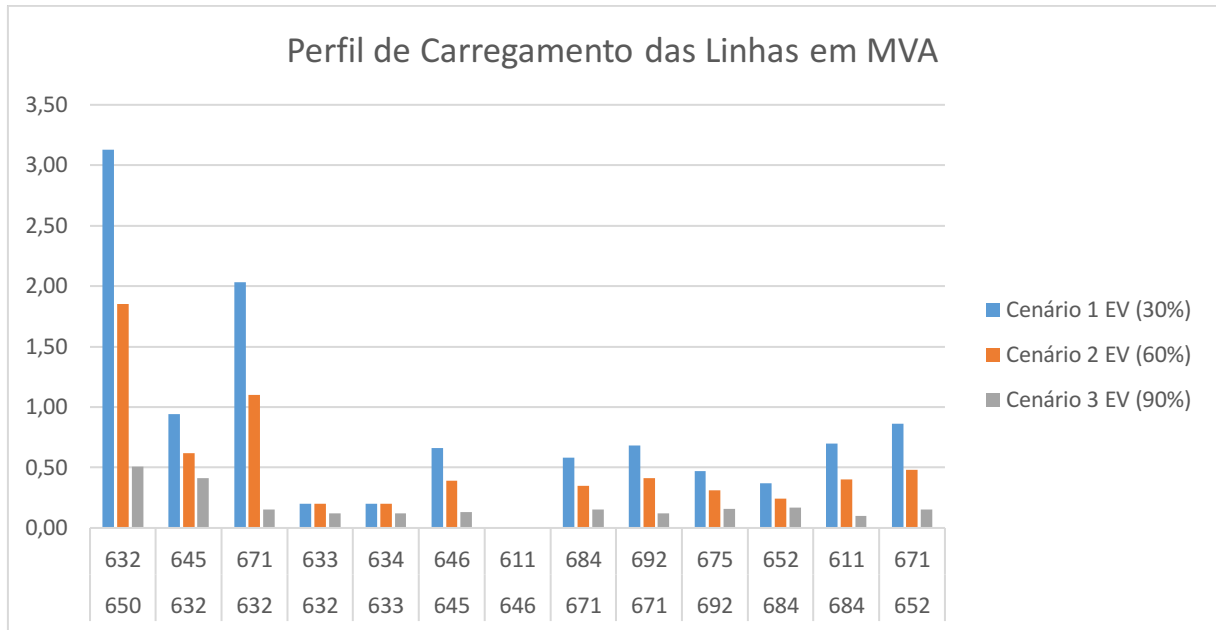


Figura 23: Perfil de carregamento das linhas nos três cenários de injeção de potência – cenário pesado. Fonte: Autor (2022).

Como em todos os cenários de carga injetando potência pelas baterias dos EVs, tivemos as tensões dentro da faixa recomendada para operação nesta última simulação também. A faixa geral para as simulações dentro desse cenário pesado de carga foi  $0,9999 pu \leq V_N \leq 1,0004 pu$ .

Esse comportamento do último cenário de injeção de 90% de potência oriundo das baterias dos veículos elétricos, se mostrou recorrente em todos os cenários de cargas (leve, médio e pesado), tornando o sistema adequado para funcionamento e fornecimento de energia. Vale ressaltar que conforme os cenários de carga foram evoluindo do leve para o pesado, ao se injetar 30% de potência, o cenário pesado mostrou a menor resposta de melhoria nesse nível de injeção.

Dentro de todas as simulações geradas até o momento também vale citar que o cenário pesado de carga com inserção de 90% de potência foi o que obteve a melhor faixa de tensão para o sistema teste, ficando entre  $1,0000 pu \leq V_N \leq 1,0003 pu$ .

#### 4.5.4 Resultados da extrapolação de EVs no cenário pesado de carga

Um último teste foi feito com a extrapolação da injeção de potência além de 100% da carga de cada barra.

Ao colocar cada gerador (representam os EVs) com as potências equivalentes a 60% da carga das barras, podemos notar que ao extrapolar algumas barras para

120% de injeção de potência tivemos uma piora em uma das linhas. Pode-se perceber isso analisando a figura 24 e as tabelas 14 e 15.

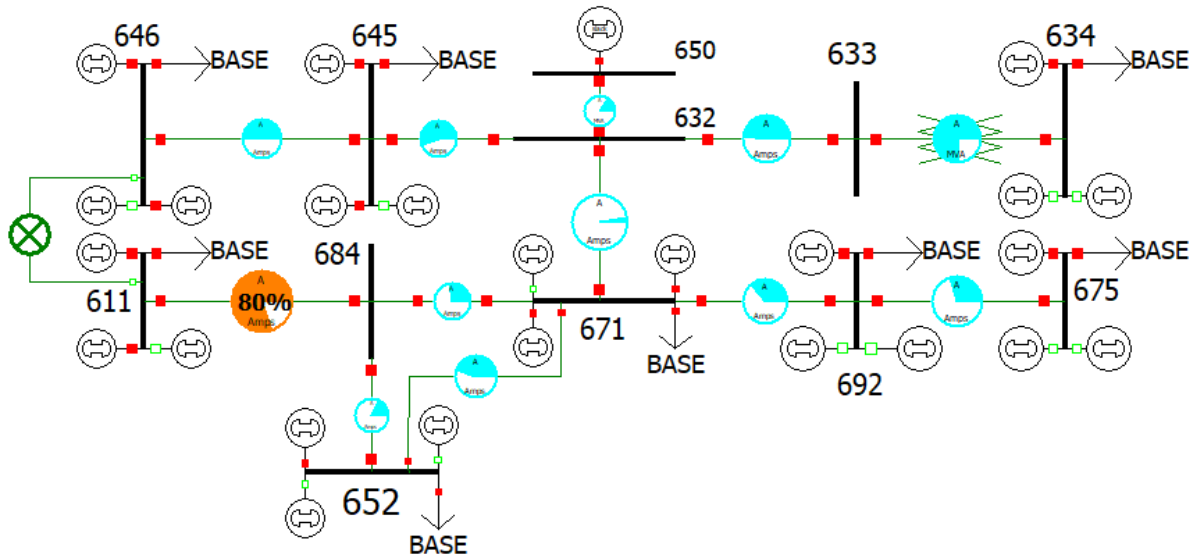


Figura 24: Ilustração do S12B com extrapolação de potência oriunda dos EVs – cenário pesado de carga. Fonte: Autor (2022).

Tabela 14: Informações sobre as barras do sistema com extrapolação de potência injetada. Fonte: Autor (2022).

ID	Cenário de extrapolação			
	Tensão (PU)	Ângulo (°)	Carga ativa (MW)	Carga reativa (Mvar)
650	1,0000	0,00		
632	1,0003	0,01		
633	1,0003	0,01		
634	1,0002	0,01	0,24	0,12
645	1,0004	0,01	0,34	0,16
646	1,0004	0,01	0,92	0,17
671	1,0000	0,06	0,77	0,29
692	1,0000	0,06	0,34	0,20
675	1,0000	0,06	0,58	0,28
684	1,0000	0,06		
611	1,0000	0,06	1,00	0,05
652	1,0000	0,06	0,26	1,12



Tabela 15: Informações sobre a utilização das barras do sistema com extrapolação de potência injetada Fonte: Autor (2022).

Cenário de extrapolação				
Da barra	Para a barra	Fluxo da linha utilizado (MVA)	Limite de fluxo da linha (MVA)	Utilização (%)
650	632	0,38	2,30	16,50
632	645	0,45	0,80	55,60
632	671	0,04	1,80	2,40
632	633	0,15	0,20	75,70
633	634	0,15	0,20	75,70
645	646	0,22	0,40	54,40
646	611	0,00	0,40	0,00
671	684	0,25	0,90	27,90
671	692	0,43	1,20	35,90
692	675	0,33	0,80	41,20
684	652	0,16	0,90	17,70
684	611	0,20	0,25	80,40
652	671	0,23	0,40	56,50

A linha que apresentou problema foi a 684 – 611 onde tivemos essa piora do sistema com a extrapolação de injeção de energia na rede, chegando a 80% da sua capacidade sinalizando estado de alerta na linha, pois se encontra próxima do limite operacional. A observação interessante dessa extrapolação é que não tivemos nenhuma sob ou sobretensão na rede. É importante informar que essa extrapolação foi feita para os cenários leve e médio de carga, mas apenas no pesado foi encontrado um impacto negativo.

## 5 CONCLUSÃO

Ao final deste trabalho, podemos notar o crescimento e investimento que vem ocorrendo no setor de veículos elétricos ao longo dos anos. Os EVs possuem um grande potencial para a diminuição da emissão de gases poluentes e podem contribuir para a economia de recursos com transporte. A possibilidade desses veículos poderem ser usados de maneiras diferentes, por exemplo, de se tornar uma fonte de energia móvel devido ao armazenamento de energia que suas baterias possuem, tornam cada vez mais atrativo o investimento nesse modelo de negócio para as empresas de energia.

Com a aplicação de estudo de caso do sistema de 12 barras proposto, podemos chegar às conclusões que condizem com as referências. As informações mais interessantes extraídas desse estudo são as simulações que demonstram a possibilidade de as baterias dos veículos serem utilizadas como armazenamento de energia excedente proveniente de fontes renováveis que podem, posteriormente, injetar energia na rede para contribuir com a necessidade do sistema, aliviando muitas linhas que estavam em estado crítico e contribuindo com o equilíbrio dos níveis de tensão, conforme visto nas simulações dentro do Cenário 4. Entretanto, também foi demonstrado que a extrapolação de injeção de potência local, pode contribuir para a piora na operação do sistema, conforme a simulação 4.5.4.

### 5.1 TRABALHOS FUTUROS

Se vê com bons olhos para o futuro do sistema elétrico de potência os veículos elétricos contribuírem para rede de uma maneira que se equipare a uma GD, mas de forma móvel, o que torna as possibilidades muito maiores de estratégias.

Nesse contexto a maior dificuldade realmente é criar uma política atrativa para os proprietários desses veículos (modelo de negócio).

Dessa forma para estudos futuros, sugere-se a análise da regulamentação de modelos de negócio que utilizem a capacidade de realizar armazenamento de energia dos veículos elétricos.

## REFERÊNCIAS

- 1 - DOW, Luther, et al. **A Novel Approach for Evaluating the Impact of Electric Vehicles on the Power Distribution System**. IEEE PES General Meeting, 2010.
- 2- MASOUM, Mohammad A.S, et al. **Distribution Transformer Losses and Performance in Smart Grids with Residential Plug-In Electric Vehicles**. ISGT 2011.
- 3- ANASTASIADIS, Anestis G. , et al. **Effects of Increased Electric Vehicles into a Distribution Network**. Technologies and Materials for Renewable Energy, Environment and Sustainability, TMREES18, 19–21 September 2018, Athens, Greece.
- 4 - BURAGOHAIN, Upasana; BORUAH, Tilok. **Fuzzy Logic Based Load Flow Analysis**. 2017 International Conference on Algorithms, Methodology, Models and Applications in Emerging Technologies (ICAMMAET).
- 5- TINNEY, William. F.; HART Clifford E. **Power Flow Solution by Newton's Method**. IEEE TRANSACTIONS ON POWER APPARATUS AND SYSTEMS, VOL. PAS-86, NO. 11, 1967.
- 6 - ANASTASIADIS, A. G., et al. **Probabilistic Load Flow Methods with High Integration of Renewable Energy Sources and Electric Vehicles – Case Study of Greece**. 2011 IEEE Trondheim PowerTech.
- 7 - DIXIT, Shishir, et al. **Power Flow Analysis Using Fuzzy Logic**. 2006 IEEE Power India Conference.
- 8 - CHATTERJEE, Sreemoyee; MANDAL, Suprovab. **A Novel Comparison of Gauss–Seidel and Newton– Raphson Methods for Load Flow Analysis**. 2017 International Conference on Power and Embedded Drive Control (ICPEDC).

9 - SOUZA, Thiago Henriques Vieira de. **Metodologia para o Estudo de Sistemas Elétricos - Uso da ferramenta computacional Power World**. Universidade Federal de Campina Grande Centro de Engenharia Elétrica e Informática Departamento de Engenharia Elétrica, Campina Grande, 2020.

10 - JUNIOR, Eloy Fassi Casagrande. Et al. **Energia solar fotovoltaica e automóveis elétricos: a combinação de um modelo para redução de emissões de carbono na cidade de Curitiba. 2019** – Revista Tecnologia e Sociedade.

11 - KRASNHAK, L. B.; MELLO, E. A. M.; URBANETZ JR, J.; CASAGRANDE JUNIOR, E. F. **Edificação de energia positiva: Análise de geração e consumo de energia elétrico no Escritório Verde da UTFPR em Curitiba**. VII Congresso Brasileiro de Energia Solar, Gramado, 2018.

12 - GUILLE, Christophe; GROSS, George. **A conceptual framework for the vehicle-to-grid (V2G) implementation**. Elsevier: Energy Policy, Illinois, v. 37, n. 11, p.4379-4390, nov. 2009.

MONTICELLI, ALCIR JOSÉ. C. **Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica**. 1. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 1983.

BORGES, CARMEN LÚCIA TANCREDO. **Análise de Sistemas de Potência**. [s.l.] Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2005.

GRAINGER, J. J.; STEVENSON, W. D. **Power System Analysis**. [S.l.]: McGraw-Hill, 1994.

IEA. **Global EV outlook 2019**. França. 2019. Disponível em: < <https://www.iea.org/>>. Acesso em: maio de 2022

ABVE. **Associação Brasileira do veículo elétrico**. Disponível em: <[www.abve.org.br/](http://www.abve.org.br/)>. Acesso em: abril de 2022

ANELL. **Agência Nacional de Energia Elétrica**. Disponível em: <[www.gov.br/aneel/pt-br](http://www.gov.br/aneel/pt-br)>. Acesso em: maio de 2022

EPE, Empresa de Pesquisa Energética. **Plano Nacional de Energia 2030**. Disponível em: <[www.epe.gov.br/pt](http://www.epe.gov.br/pt)>. Acesso em: junho de 2022