

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROJETO DE GRADUAÇÃO**

SILMAR FERNANDO DO NASCIMENTO

**ANÁLISE DOS IMPACTOS NA REDE DE DISTRIBUIÇÃO
DEVIDO À INSERÇÃO DE VEÍCULOS ELÉTRICOS *PLUG-IN***

VITÓRIA – ES
DEZEMBRO/2019

SILMAR FERNANDO DO NASCIMENTO

**ANÁLISE DOS IMPACTOS NA REDE DE DISTRIBUIÇÃO DEVIDO À
INSERÇÃO DE VEÍCULOS ELÉTRICOS *PLUG-IN***

Parte manuscrita do Projeto de Graduação do aluno **Silmar Fernando do Nascimento**, apresentada ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. D.Sc. Oureste Elias Batista

Coorientador: Prof. D.Sc. Augusto César Rueda Medina

VITÓRIA – ES
DEZEMBRO/2019

SILMAR FERNANDO DO NASCIMENTO

**ANÁLISE DOS IMPACTOS NA REDE DE DISTRIBUIÇÃO DEVIDO À
INSERÇÃO DE VEÍCULOS ELÉTRICOS *PLUG-IN***

Parte manuscrita do Projeto de Graduação do aluno **Silmar Fernando do Nascimento**, apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Aprovada em 20 de dezembro de 2019.

COMISSÃO EXAMINADORA:

Prof. D.Sc. Oureste Elias Batista
Universidade Federal do Espírito Santo
Orientador

Profa. D. Sc. Jussara Farias Fardin
Universidade Federal do Espírito Santo
Examinador

Prof. Edmilson Bermudes Rocha Júnior
Instituto Federal do Espírito Santo
Examinador

*“...So are you gonna die today or make it out alive?
You gotta conquer the monster in your head and then you'll fly
Fly, phoenix, fly
It's time for a new empire
Go bury your demons then tear down the ceiling
Phoenix, fly...”*

League of Legends - Phoenix

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família e aos meus pais Marcia dos Anjos Fernando e Silvano do Nascimento pelo incentivo nas horas difíceis, de desânimo e cansaço. A compreensão e apoio desde o início foi importante para chegar onde eu cheguei.

Meus agradecimentos aos amigos de longa data, companheiros de vôlei e todos aqueles que fizeram parte desse período da minha vida. O caminho foi longo, mas a confiança e incentivo dado foi de extrema importância para a conclusão dessa última etapa. Um agradecimento especial ao meu amigo Gabriel Sarmento pelo incentivo, preocupação e parceria durante todo esse período. As cobranças e incentivos na medida certa foram cruciais para eu não desistir e seguir em frente.

Meus agradecimentos aos companheiros de *wow* e todos aqueles que ficaram até altas horas no *Discord* seja estudando, jogando ou simplesmente conversando. As noites e madrugadas não seriam as mesmas sem vocês. Agradeço aos meus amigos Charles Nascimento e Victor Luz pelo incentivo, preocupação e parceria durante esse período. Um agradecimento especial para Rubens Slaviero por ter me dado suporte e atenção durante a realização do projeto. Os momentos conversando coisas aleatórias e assistindo *Penn & Teller* e *Dota TI* foram de extrema importância para superar os momentos conturbados.

Por fim, mas não menos importante, agradeço a todos os professores que participaram da minha formação. Agradeço ao meu professor e orientador D.Sc. Oureste Elias Batista pelo apoio, confiança e empenho dedicado na elaboração do trabalho. Agradeço a todos que, diretamente ou indiretamente fizeram parte disso tudo.

RESUMO

Neste trabalho são abordados os temas referentes ao fluxo de potência, redes de distribuição e veículos elétricos, bem como suas vantagens e desvantagens sobre o atual uso de veículos à combustão. Também são apresentadas simulações computacionais para ilustrar quais são os impactos dos inserção desordenada de veículos elétricos à rede de distribuição no cenário de sua maior utilização, o horário de ponta, numa região hipotética e genérica da cidade de Vitória seguindo a expectativa de crescimento desses veículos no ano de 2025. Por fim, são discutidos os resultados obtidos pelo *software OpenDSS* e são apresentados os tratamentos necessários para que o sistema comporte a mudança de cenário e esteja dentro dos parâmetros das normas regulamentadoras. Adicionalmente, são apresentadas possíveis soluções para resolver os novos problemas gerados com o crescimento progressivo da frota de veículos elétricos ligados a rede elétrica a fim de que o sistema suporte tais mudanças e ainda seja capaz de prever possíveis expansões sem comprometer seu desempenho.

Palavras-chave: Veículos elétricos. Rede de distribuição. Fluxo de potência. Carregamento desordenado.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diagrama do fluxo de potência de um motor de combustão interna.....	17
Figura 2 – Diagrama do fluxo de potência de um motor de indução	18
Figura 3 – Subsistemas da rede de distribuição.....	24
Figura 4 – Sistema da rede de distribuição	30
Figura 5 – Curvas de carga dos modelos de VE.....	34
Figura 6 – Tensão média nos barramentos do sistema às 19 horas sem adição de veículos elétricos.....	48
Figura 7 – Tensão média nos barramentos do sistema às 19 horas com adição de veículos elétricos.....	50
Figura 8 – Tensão média nos barramentos do sistema às 21 horas sem adição de veículos elétricos.....	52
Figura 9 – Tensão média nos barramentos do sistema às 21 horas com adição de veículos elétricos.....	54

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Quantidade de veículos por combustíveis da Grande Vitória	19
Gráfico 2 – Curva de carga residencial.....	32
Gráfico 3 – Curva de carga comercial	32
Gráfico 4 – Curvas de carga dos modelos de VE	33
Gráfico 5 – Curva de carga do sistema sem veículos elétricos.....	36
Gráfico 6 – Fator de Potência do sistema sem veículos elétricos.....	37
Gráfico 7 – Curva de carga do sistema com veículos elétricos	38
Gráfico 8 – Curvas do sistema com veículos elétricos	38
Gráfico 9 – Perfil de tensão da fase R às 19 horas sem adição de veículos elétricos.....	48
Gráfico 10 – Perfil de tensão da fase S às 19 horas sem adição de veículos elétricos	49
Gráfico 11 – Perfil de tensão da fase T às 19 horas sem adição de veículos elétricos	49
Gráfico 12 – Perfil de tensão da fase R às 19 horas com adição de veículos elétricos	50
Gráfico 13 – Perfil de tensão da fase S às 19 horas com adição de veículos elétricos.....	51
Gráfico 14 – Perfil de tensão da fase T às 19 horas com adição de veículos elétricos.....	51
Gráfico 15 – Perfil de tensão da fase R às 21 horas sem adição de veículos elétricos.....	52
Gráfico 16 – Perfil de tensão da fase S às 21 horas sem adição de veículos elétricos	53
Gráfico 17 – Perfil de tensão da fase T às 21 horas sem adição de veículos elétricos	53
Gráfico 18 – Perfil de tensão da fase R às 21 horas com adição de veículos elétricos	54
Gráfico 19 – Perfil de tensão da fase S às 21 horas com adição de veículos elétricos.....	55
Gráfico 20 – Perfil de tensão da fase T às 21 horas com adição de veículos elétricos.....	55

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Relação entre tipo de tomada e o tempo de carga médio para veículos elétricos	21
Quadro 2 – Classificação dos níveis de tensão medidos	26
Quadro 3 – Potência elétrica no barramento de entrada do sistema	41
Quadro 4 – Perfil de tensão da fase S às 19 horas sem adição de veículos elétricos	43
Quadro 5 – Perfil de tensão da fase S às 19 horas sem adição de veículos elétricos	44
Quadro 6 – Perfil de tensão da fase S às 19 horas sem adição de veículos elétricos	46
Quadro 7 – Tensão nos barramentos do sistema às 19 horas sem adição de veículos elétricos	56
Quadro 8 – Componentes simétricas dos barramentos do sistema às 19 horas sem adição de veículos elétricos	57
Quadro 9 – Tensão nos barramentos do sistema às 19 horas com adição de veículos elétricos.....	57
Quadro 10 – Componentes simétricas dos barramentos do sistema às 19 horas com adição de veículos elétricos.....	57
Quadro 11 – Tensão nos barramentos do sistema às 21 horas sem adição de veículos elétricos.....	58
Quadro 12 – Componentes simétricas dos barramentos do sistema às 21 horas sem adição de veículos elétricos.....	58
Quadro 13 – Tensão nos barramentos do sistema às 21 horas com adição de veículos elétricos.....	58
Quadro 14 – Componentes simétricas dos barramentos do sistema às 21 horas com adição de veículos elétricos.....	59
Quadro 15 – Fator de desequilíbrio nos barramentos nos horários de ponta.....	59

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANP	Agência Nacional de Petróleo
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BSS	<i>Battery Swap Station</i>
CA	Corrente Contínua
CC	Corrente Alternada
FD	Fator de Desequilíbrio
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
MatLab	<i>Matrix Laboratory</i>
MCI	Motor a Combustão Interna
MUSD	Montante de Uso do Sistema de Distribuição.
OpenDSS	<i>Distribution System Simulator</i>
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional
SEP	Sistema Elétrico de Potência
SIN	Sistema Interligado Nacional
T _{nom.}	Tensão Nominal
T _{leit.}	Tensão de Leitura
VE	Veículo Elétrico
V2G	<i>Vehicle-to-Grid</i>

SUMÁRIO

1	APRESENTAÇÃO	11
2	JUSTIFICATIVA	13
3	OBJETIVOS	14
	3.1 Objetivo Geral	14
	3.2 Objetivos Específicos	14
4	EMBASAMENTO TEÓRICO	15
	4.1 Análise Comparativa entre Veículos Elétrico e Combustão Interna	15
	4.1.1 Eficiência Energética.....	15
	4.1.2 Poluição Atmosférica	18
	4.1.3 Mudança de Hábitos	20
	4.2 Sistema Elétrico de Potência	22
	4.2.1 Sistema de Distribuição	24
	4.2.2 Fluxo de Potência	27
5	METODOLOGIA E ETAPAS DO DESENVOLVIMENTO	29
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO	36
	6.1 Potência do Sistema	36
	6.2 Carregamento dos transformadores	40
	6.2.1 Barramento 9	42
	6.2.2 Barramento 25	43
	6.2.3 Barramento 160	45
	6.3 Perfil de Tensão	47
7	CONCLUSÃO	61
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	64

1 APRESENTAÇÃO

De acordo com o cenário atual, o mundo pode estar prestes a viver uma nova revolução automobilística e dois processos parecem ter levado a essa situação. O primeiro é consequência da limitação entre uma exploração de recursos energéticos cada vez mais dependente de derivados petróleo, um recurso finito, e a crescente necessidade do uso energia para o desenvolvimento dos países. Gradativamente, essa situação converge cada vez mais para o aumento do valor dos derivados do petróleo e consequentemente tornam as fontes de energias alternativas mais competitivas e atrativas (SANTOS et al., 2009).

Neste cenário, uma das possibilidades para a segunda revolução automobilística pode ser a implementação de veículos elétricos, apesar de suas incertezas e desvantagens. Os veículos elétricos se mostram promissores para ajudar a solucionar os problemas que os veículos a combustão geraram com o passar do tempo como poluição atmosférica e sonora, eficiência energética, entre outros. As vantagens dos veículos elétricos ficaram escondidas durante um bom tempo devido à falta de incentivo e estudos, porém, com a conscientização da sociedade sobre a necessidade do uso de fontes renováveis e avanços nessa tecnologia, os veículos elétricos estão conquistando cada vez mais espaço (SANTOS, A. C. F. R., 2017).

Os veículos elétricos também apresentam diversas desvantagens assim como os veículos à combustão, porém, parte delas são indiretas e fáceis de serem controladas. Os exemplos mais comuns desses problemas são os tipos de poluição, geradas pelas usinas ou baterias, mudanças de hábitos da sociedade, e a estrutura do sistema elétrico para comportar a inserção dos veículos elétricos. Este último é o mais preocupante e merece um tratamento especial pois a tendência da população ao fazer o carregamento dos veículos iria coincidir com o período de maior demanda. Assim, faz-se necessário o estudo dos impactos que o aumento da inserção de veículos elétricos pode causar na rede de distribuição (SANTOS et al., 2009).

O sistema de distribuição é configurado para comportar uma quantidade de cargas projetadas anteriormente. Apesar disso, uma das características desse sistema é a capacidade de expansão, onde novas cargas podem ser adicionadas sem muitos danos ao atual sistema. Analisando pela ótica da concessionária, a adição de veículos elétricos não

são cargas facilmente previstas para o sistema pois o consumidor pode adaptar em sua residência tomadas domésticas para a recarga desses veículos (SANTOS, A. C. F. R., 2017). Esse hábito muda a dinâmica do sistema e exige da rede mais do que estava previsto anteriormente. Assim, se não houver um tratamento adequado para suportar esse cenário, haverá perdas desnecessárias, quedas de tensão, desequilíbrio entre fases e baixo fator de potência, fazendo com que a qualidade de energia disponível para os consumidores fique prejudicada.

2 JUSTIFICATIVA

A necessidade de novas formas de energia alternativa para o desenvolvimento sustentável e a diminuição das emissões de gases do efeito estufa são os principais motivos pelo ressurgimento dos veículos elétricos como forma viável de transporte. Muitos países já estão investindo no desenvolvimento de novas tecnologias para suportar essa nova fase no mercado automobilístico e assim criaram metas para a eliminação de veículos a combustão. Assim, analisando o cenário atual em que há uma grande dependência de combustíveis fósseis no setor automobilístico é de fundamental importância um estudo voltado para os processos desse setor (BARASSA, 2015).

Os veículos elétricos, principalmente os que são recarregados puramente por fontes externas de energia, introduzem a eliminação dos derivados de petróleo para produção de energia, porém, podem gerar grandes impactos no sistema elétrico de potência. Esse sistema, que é responsável pelo processo de gerar e entregar energia elétrica aos diversos tipos de consumidores, pode não estar preparado para suportar esse acréscimo tão elevado de cargas (SALDANHA, 2017). Adicionalmente, a maior preocupação está quando ocorre a recarga dos veículos elétricos pois a adição destas cargas tende a coincidir com o horário de ponta e ser descontrolada.

Além da necessidade de ter conhecimento da tecnologia de veículos elétricos *plug-in*¹, faz-se necessário o estudo sobre as possíveis consequências do uso dessa tecnologia. Muito se sabe sobre os benefícios dos veículos elétricos, porém o uso em grande escala dos veículos elétricos não é tão divulgado, o que pode gerar bastante incômodo caso o novo cenário do sistema de potência não seja tratado com devida atenção (BASSO, 2011).

¹ Veículos elétricos *plug-in* são automóveis cuja bateria pode ser carregada diretamente por meio de tomadas.

3 OBJETIVOS

3.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho consistiu em analisar as consequências da adição de veículos elétricos *plug-in* de forma desordenada num sistema de distribuição em um bairro genérico da cidade de Vitória numa situação hipotética. O trabalho priorizou em apresentar as consequências na rede de distribuição elétrica, mostrando por meio de simulações durante os horários de ponta, o que o aumento de carga provocou no sistema.

3.2 Objetivos Específicos

Para alcançar o objetivo geral deste trabalho, os seguintes objetivos específicos foram atendidos:

- i. Apresentar as motivações para a substituição da frota de veículos a combustão por veículos elétricos;
- ii. Criar um cenário de um bairro genérico para simulação usando o *software OpenDSS*;
- iii. Apresentar as expectativas para a frota de veículos elétricos para o ano de 2025;
- iv. Criar e introduzir o modelo de veículos elétricos no cenário anterior a fim de entender suas consequências no sistema de distribuição;
- v. Analisar os resultados obtidos pelo programa;
- vi. Apresentar as principais conclusões obtidas sobre os impactos no sistema de distribuição;
- vii. Propor possíveis soluções para adequar o novo sistema às normas e possíveis expansões.

4 EMBASAMENTO TEÓRICO

4.1 Análise Comparativa entre Veículos Elétrico e Combustão Interna

A presença de veículos elétricos estão cada vez mais fazendo parte da realidade de muitas pessoas. Um dos fatores que antes era um dos motivos para o atraso do avanço dos veículos elétricos, políticas públicas e incentivos fiscais, ultimamente está alavancando cada vez mais a troca dos veículos à combustão. Muitos países, principalmente os da Europa, estão incentivando e colocando metas para cada vez mais alcançar o desenvolvimento sustentável (RICARDO, 2012).

Os motivos que tornaram os veículos elétricos uma alternativa importante para alcançar o desenvolvimento sustentável se baseia no tipo de energia usada e principalmente a eficiência no processo de conversão de energia. Assim, será apresentada as características entre esses dois modelos em aspectos que são decisivos na escolha dos modelos (BARASSA, 2015).

4.1.1 Eficiência Energética

Os veículos elétricos apresentam uma maior vantagem econômica e ambiental do que os veículos a combustão interna. O primeiro tópico a ser analisado é o rendimento do motor, mostrando o fluxo de potência do mesmo e destacando, em média, qual parte da energia da entrada do sistema realmente é convertida em energia mecânica. Um outro tópico é o rendimento do veículo pois, além de ter o motor como importante parte do carro, existem outros fatores como transmissão, calor, perdas suplementares, entre outros que afetam no rendimento global de cada carro. Como existem carros com inúmeras configurações, será usado como exemplo um teste feito com carros de características similares para se ter uma boa comparação entre veículos elétricos e a combustão (SANTOS, A. C. F. R., 2017).

Motores a combustão são máquinas baseadas nos princípios da termodinâmica em que reações químicas com fluídos gasosos produzem energia mecânica. As máquinas que utilizam os gases de combustão para realizar os processos de compressão, combustão, expansão e exaustão são conhecidas como motores de combustão interna (SILVA, A. O., 2018). A maior parte desses motores utilizam combustível fóssil ou biocombustível, como álcool e biodiesel, para a produção de energia.

Devido ao forte incentivo da indústria do petróleo após a primeira guerra mundial e pela facilidade de implementar uma estrutura que desse suporte a esses veículos, o sistema a combustão foi ganhando mais espaço e atualmente é o mais presente dentre os motores movidos a combustível. Apesar dessa grande parcela na representatividade dos veículos, esse sistema é ineficiente, gera energia de fontes não-renováveis, e emite gases poluentes, o que é uma das maiores preocupações atualmente (SILVA, J. P. N., 2014).

O rendimento de um motor a combustão é ineficiente por diversos motivos. Primeiramente, esse motor gera energia através da combustão, ou seja, haverá a queima de um combustível e conseqüentemente haverá geração de calor. Uma parte significativa da energia produzida por um MCI é perdida em forma de calor, aproveitando apenas uma parcela para produzir energia mecânica (SILVA, A. O., 2018). O tipo de combustão também contribui para o seu baixo rendimento. O poder calorífico de cada combustível é a quantidade de energia que determinado material pode produzir por uma certa quantidade de massa num processo de combustão completa. Contudo, essa variável expressa um valor que não é alcançado nos MCI. A combustão nos veículos na maioria das vezes é incompleta, o que significa que nem todo o potencial do combustível é aproveitado na conversão para energia mecânica (SANTOS, A. C. F. R., 2017). Mesmo nos veículos onde ocorrem o reaproveitamento dos produtos da combustão, a energia gerada é bem abaixo do poder calorífico do combustível. Por último, temos as perdas por atrito. A transmissão da energia mecânica no veículo a combustão contém muitas peças móveis e o desgaste, atrito, e deslizamento entre essas peças geram uma perda de energia mecânica significativa (SILVA, A. O., 2018).

A Figura 1 representa bem as condições de um motor a combustão apresentado acima. Pode-se perceber que a maior parte da energia contida nos combustíveis é lançada para o ambiente seja por combustão incompleta do combustível ou pela energia térmica não aproveitada pelo sistema, como por exemplo, energia térmica dos gases de escape ou trocas térmicas com o ambiente. Portanto, é facilmente notado que o rendimento de um MCI é ineficiente.

Figura 1 – Diagrama do fluxo de potência de um motor de combustão interna



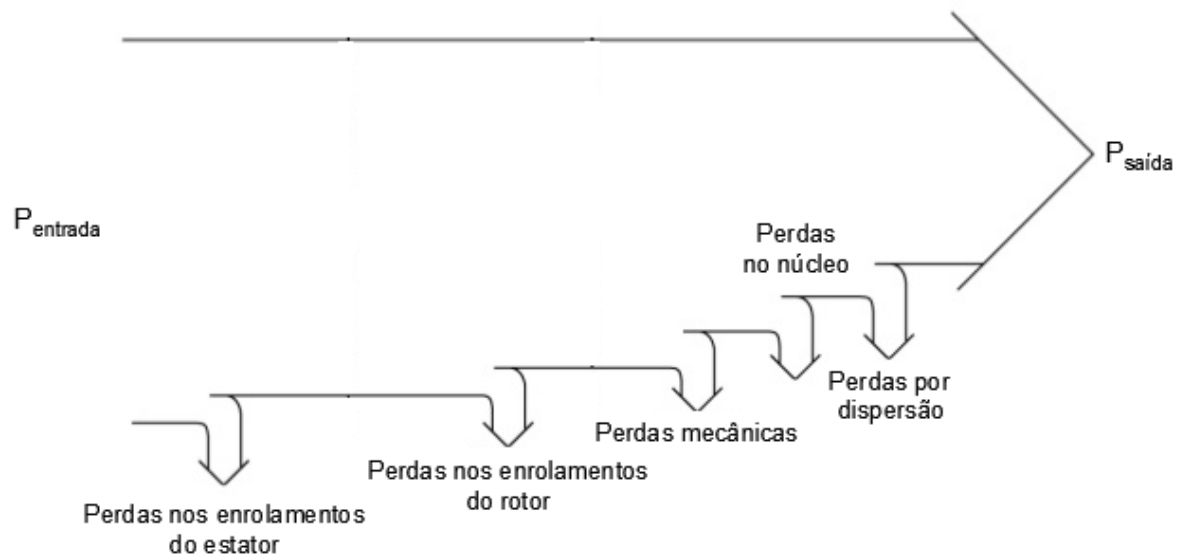
Fonte: Santos, J. (2018).

Nota: Adaptado pelo autor.

As máquinas elétricas são baseadas nos princípios do eletromagnetismo para converter energia elétrica em energia mecânica. Para que ocorra movimento na máquina, a conversão eletromagnética é consequência da interação dos campos magnéticos do rotor com o estator (SANTOS, A. C. F. R., 2017). Apesar da estrutura de umas máquinas serem bem diferentes umas das outras, essa interação sempre estará presente na máquina. Por exemplo, em motores assíncronos (máquinas de indução) a tensão CA da fonte alimenta as bobinas no estator para produzir o campo girante. Os condutores do rotor terão tensão induzida devido ao movimento relativo do condutor imerso num campo magnético, e estes, por serem curto-circuitados, produzirão um campo magnético, que tende a seguir o campo girante, devido a corrente que circulará no rotor. Assim, a interação entre esses dois campos faz o eixo rotacionar. Já os motores CC, além de já se diferenciarem das máquinas assíncronas pela fonte de alimentação, a tensão CC alimenta o rotor e a interação do campo dos eletroímãs do estator com o campo do rotor gera torque e produz o movimento.

A Figura 2 ilustra o fluxo de potência em motor assíncrono e que, mesmo não sendo o mais usado na maior parte dos veículos elétricos, apresenta um rendimento superior em relação aos motores à combustão interna. Como se pode perceber, a maior parte das perdas estão relacionadas a perdas *joulicas* e magnéticas, porém, a quantidade de energia elétrica convertida em mecânica é superior a MCI.

Figura 2 – Diagrama do fluxo de potência de um motor de indução



Fonte: Hafner (2013).

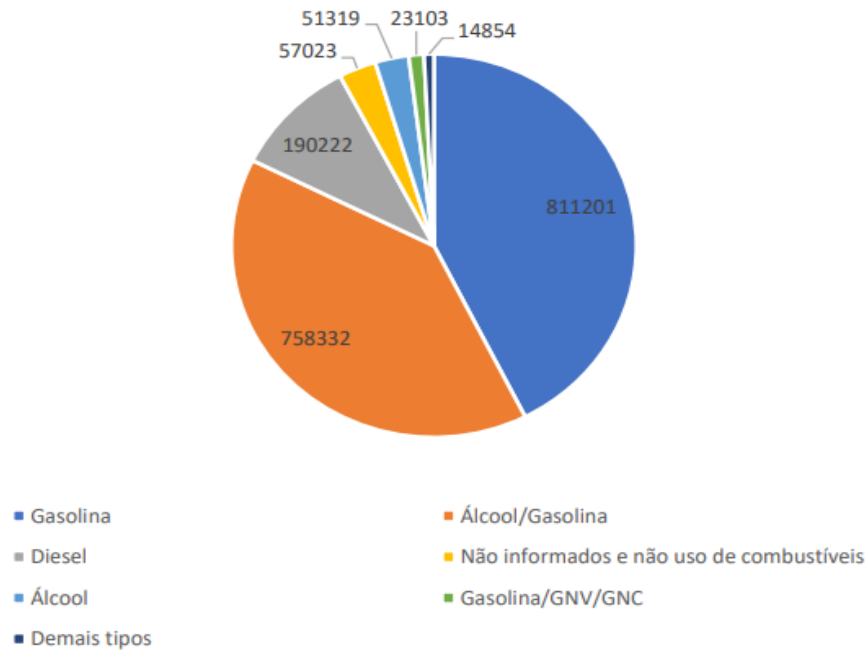
Nota: Adaptado pelo autor.

4.1.2 Poluição Atmosférica

O problema da poluição vem se destacando cada vez mais com as consequências do uso abusivo de combustíveis fósseis e a conscientização dos países da necessidade de um desenvolvimento sustentável. Para convergir cada vez mais para a realidade de um desenvolvimento sustentável, uma das medidas necessárias tomadas foi da limitação dos gases poluentes lançados na atmosfera. Cada país respondeu a essa necessidade de maneira diferente.

A poluição atmosférica por veículos a combustão é um tópico bastante conhecido principalmente após a crise do petróleo. Apesar dos veículos não serem os únicos responsáveis pela maior parte das consequências, sua contribuição é significativa e com o devido cuidado pode-se melhorar a qualidade de vida de muitos sem afetar os hábitos diários (SILVA, J. P. N., 2014). As consequências da poluição atmosférica promovem uma série de problemas como de saúde, visual e ambiental (SANTOS, A. C. F. R., 2017). No Brasil, segundo a Agência Nacional de Petróleo (ANP, 2019, p. 137), os principais combustíveis usados pelos veículos são o diesel, a gasolina e o etanol, sendo o diesel com a maior parcela de utilização, ilustrado no Gráfico 1 tem-se a quantidade de veículo por cada combustível na região da Grande Vitória.

Gráfico 1 – Quantidade de veículos por combustíveis da Grande Vitória



Fonte: DETRAN-ES (2018).

Nota: Adaptado pelo autor.

Esses combustíveis são comercializados com algumas impurezas que são prejudiciais ou ao meio ambiente ou à saúde humana. A gasolina e o diesel frequentemente possuem uma quantidade significativa de enxofre e de nitrogênio que durante a combustão produzem dióxido de enxofre (SO₂) e óxido nitroso (NO₂). Além dos gases monóxido de carbono (CO) e dióxido de carbono (CO₂), que são bastante conhecidos por serem um dos principais gases do efeito estufa, o óxido nitroso e dióxido de enxofre tem um peso muito importante na poluição atmosférica pois estes são responsáveis pela produção de ozônio na troposfera (que provoca desconforto respiratório e envelhecimento precoce), chuvas ácidas e graves danos aos pulmões (SANTOS, A. C. F. R., 2017).

O maior poluente dentre os combustíveis mais comum no Brasil é o diesel. Este, por possuir cadeia longa de hidrocarbonetos, possui maior poder calorífico e precisa de uma quantidade elevada de O₂ para que ocorra a combustão completa. Na falta do excesso de oxigênio, os produtos da combustão incompleta são fuligem, monóxido de carbono (CO), e hidrocarbonetos, sendo um dos mais nocivos o benzeno (C₆H₆) que é altamente cancerígeno. Com isso, apesar do diesel ser o mais eficiente em relação aos outros combustíveis, a poluição do motor a diesel faz com que ele polua até sete vezes mais do que um motor a gasolina (SANTOS, A. C. F. R., 2017).

Os veículos elétricos contribuem para a redução da poluição atmosférica em dois aspectos: não emissão direta de gases do efeito estufa e poluição concentrada. Os veículos elétricos, mesmo não gerando poluição na conversão de energia elétrica em mecânica, geram poluição de forma indireta através da matriz energética do país (BASSO, 2011). Assim, se o método de geração de energia for predominantemente nuclear, os veículos elétricos poluem o correspondente a uma parcela desse processo de geração de energia. A grande vantagem da poluição destes veículos é a fonte poluente que se encontra concentrada em um local (SALDANHA, 2017). Para atacar o foco ou minimizar ao máximo o efeito da poluição, é mais eficaz atuar num ponto concentrado do que num perímetro muito grande, como acontece com os veículos a combustão que poluem por onde estes passam. Assim, mesmo sabendo que os veículos elétricos também contribuem com a poluição atmosférica, tem-se que a mudança do cenário facilita o controle da poluição ao atuar num foco concentrado e ainda assim afasta os poluentes de perto da população, o que melhora a qualidade do ar (SANTOS, A. C. F. R., 2017).

4.1.3 Mudança de Hábitos

Uma das preocupações, apesar de pequena, é do impacto que a mudança de um sistema para outro poderia causar na sociedade. Atualmente, a realidade das pessoas é o uso de veículos a combustão para cumprir suas tarefas diárias, e isso não se resume apenas ao cotidiano de um indivíduo, mas se estende para turismo, importação e exportação, dentre outros. A qualidade de vida que um veículo elétrico pode proporcionar ainda é o mesmo que a de um veículo a combustão se levarmos em conta o transporte. Porém, quando se analisa ciclos de recarga/abastecimento, os veículos a combustão proporcionam uma facilidade que pode ser mais atrativa para a população.

Os veículos elétricos em geral têm autonomia menor do que os veículos a combustão, sendo necessário ciclos de recarga mais frequentes. Além do mais, o tempo para reabastecer um veículo a combustão é consideravelmente menor do que um veículo elétrico. Enquanto os carros a combustão demoram cerca de 3 min para encher o tanque, um carro elétrico demoraria cerca de 25 horas usando uma tomada de 10 A ou no melhor dos casos 1,6 horas numa tomada de 63 A trifásico segundo o Quadro 1. Assim como postos de gasolina, existem pontos de recarga para veículos elétricos, porém, também, são necessários cerca de 30

minutos para a recarga da bateria do carro do nível mínimo até 80% de sua capacidade total (SANTOS, A. C. F. R., 2017).

Quadro 1 – Relação entre tipo de tomada e o tempo de carga médio para veículos elétricos

Tipo de Tomada	Tempo de Carga [h]
Tomada Doméstica (10 A)	25
Tomada Monofásica de 3,7 kW (16 A)	15
Tomada Monofásica de 7,4 kW (32 A)	7,4
Tomada Trifásica de 11 kW (16 A)	4,5
Tomada Trifásico de 22 kW (32 A)	2,6
Tomada Trifásico de 43 kW (63 A)	1,6

Fonte: Santos, A. C. F. R. (2017).

Nota: Adaptado pelo autor.

Analisando as aplicações desses veículos na vida de pessoas, pode-se notar que a recarga seria um dos principais motivos para a desaprovação da população dos veículos elétricos devido ao tempo de carga. Uma das soluções seria incentivar as pessoas a recarregarem os veículos elétricos em casa, durante a noite, numa tomada de uso específico projetada para veículo. Assim, considerando a autonomia de um veículo elétrico de 300 km por carga, esse problema seria solucionado (SANTOS, A. C. F. R., 2017).

Alternativamente, existem projetos que incentivam o aluguel da bateria. Desse modo, sempre que a bateria do carro estivesse acabando, ao invés de recarregar, o proprietário do veículo poderia simplesmente trocar a bateria por uma já carregada (CORRÊA, 2018). Essa alternativa, apesar de mais cara, incentiva as pessoas a fazerem uma manutenção preventiva no carro frequentemente, retira a responsabilidade de pessoas leigas de lidarem com a

poluição que poderia ser gerada pelo descarte inadequado da bateria quando esta não for mais útil, e não consome tanto tempo quanto a recarga.

Esse modelo, conhecido como *Battery Swap Stations* - BSS, é uma peça importante para o chamado carregamento coordenado. Os veículos elétricos ao serem adicionados como carga extra contribuem com três consequências no sistema elétrico de potência: aumento de perdas, desequilíbrio de fase e queda nos níveis de tensão (SALDANHA, 2017). Assim, para comportar essa carga extra o mais sensato seria uma mudança no sistema de energia de modo que a adição dessa carga extra seja prevista e as consequências negativas dela estejam previamente calculadas e enquadradas dentro dos padrões aceitáveis. Entretanto, o objetivo do carregamento coordenado é atuar reduzindo o pico de demanda para comportar essas cargas adicionais sem grandes mudanças no sistema elétrico. Existem três principais modelos para o carregamento coordenado: carregamento com deslocamento e pico, carregamento com preenchimento de vale, e carregamento com corte de pico (CORRÊA, 2018).

Ao analisar os veículos elétricos individualmente, o acréscimo de carga não reflete em muitos problemas. Entretanto, ao observar numa escala maior, prevendo o crescimento da frota de veículos elétricos, e adicionando que o período de carregamento desses veículos provavelmente se dará em horário de ponta, percebe-se que o sistema elétrico pode não suportar, podendo entrar em colapso (SALDANHA, 2017). A solução do carregamento coordenado seria de deslocar esse pico de demanda do horário de ponta para outros horários em que a rede elétrica esteja trabalhando menos carregada (CORRÊA, 2018).

4.2 Sistema Elétrico de Potência

O conjunto das instalações e equipamentos que tem como função de gerar e transmitir energia em grandes blocos de potência é denominado de sistema elétrico de potência, SEP. A indústria de energia elétrica é responsável pela produção, transmissão, distribuição e comercialização da energia (BASSO, 2011). No Brasil, o sistema elétrico de potência é interligado formando o sistema interligado nacional (SIN), que cobre a maior parte do território nacional. O norte do país é o único que não é completamente contemplado pelo SIN devido a sua geografia, contando com sistemas isolados para suprir suas necessidades (ROCHA, 2010). O sistema elétrico de potência brasileiro é segmentado da seguinte maneira:

- **Geração:** Subsistema responsável pela conversão de outras formas de energia em energia elétrica. As fontes de energia ditas como convencionais no Brasil são as usinas hidroelétricas e termoelétricas movidas a carvão mineral, óleo combustível, gás natural ou nucleares. Por apresentar um grande potencial hidráulico, a maior parte da energia gerada no Brasil é proveniente de hidroelétricas. Os níveis de tensão na geração brasileira normalmente se encontram na faixa de 2,2 kV a 22 kV.
- **Transmissão:** Para atender a grande distância entre os centros consumidores de energia e as usinas geradoras de energia, o sistema de transmissão é o meio usado para que a energia produzida chegue próximo dos centros consumidores visando a menor perda de energia possível e com qualidade para o consumo. A tensão de saída dos geradores é ampliada a níveis mais altos por meio de transformadores elevadores para viabilizar a transmissão a média e longas distâncias devido a menor perdas por efeito joule e à seção do condutor usado ao longo das linhas de transmissão. Os níveis de tensão usuais de transmissão adotadas no Brasil podem variar de 230 kV a 750 kV em corrente alternada e 600 kV em corrente contínua. Sistemas de transmissão com distâncias superiores a 600 km a 800 km são indicados a fazerem transmissão em corrente contínua.
- **Distribuição:** No sistema de distribuição de energia ocorre a conexão dos centros consumidores com a rede elétrica. O sistema de distribuição pode ser dividido em três subsistemas: subtransmissão, distribuição primária e distribuição secundária. Por razões de segurança e economia, a tensão recebida pelo sistema de transmissão é reduzida a níveis mais baixos antes de atender os consumidores.

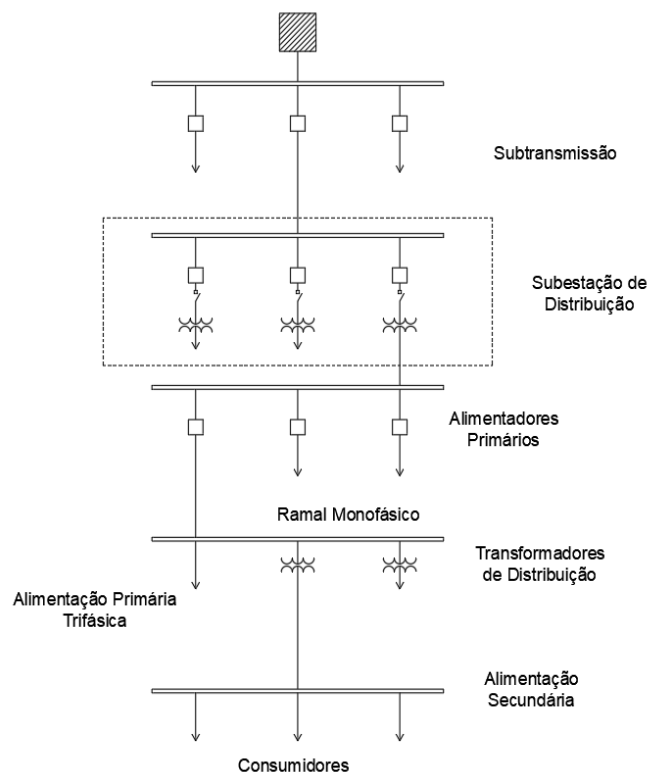
O objetivo do projeto foi de avaliar os impactos do acréscimo das cargas provenientes de veículos elétricos em horários de ponta nas redes de distribuição. Assim, realizou-se um estudo mais profundo de como o sistema de distribuição funciona e suas principais características.

4.2.1 Sistema de Distribuição

As redes de distribuição possuem topologia predominantemente radial, cargas de diferentes naturezas, linhas sem transposição e com resistência elevada. Os tipos de conexões no sistema de distribuição não são únicos, podendo existir conexões monofásicas, bifásicas e trifásica o que prejudica e os estudos nesses sistemas por não serem homogêneo (ROCHA, 2010). A Figura 3 apresenta as subdivisões do sistema de distribuição atual.

O primeiro subsistema da rede de distribuição é a subtransmissão. As linhas de subtransmissão conectam as redes de transmissão às subestações de distribuição ou à grandes indústrias. Essas linhas operam em alta tensão, normalmente numa faixa entre 69 kV a 138 kV. Esse subsistema é composto por circuitos trifásicos que possuem a capacidade de transmitir potência de até 150 MW. Normalmente as linhas de subtransmissão são sistemas radiais, mas podem ser conectadas em malha em interconexões e subestações abaixadoras de distribuição a fim de aumentar a confiabilidade do sistema elétrico ou aumentar o desempenho da rede (ANEEL, 2019).

Figura 3 – Subsistemas da rede de distribuição



Fonte: ANEEL (2019).

Nota: Adaptado pelo autor.

As subestações de distribuição fazem a conexão entre a rede de subtransmissão com os alimentadores da rede de distribuição primária. Nessa instalação, a alta tensão da subtransmissão é rebaixada para a média tensão. Conectados nas instalações de média tensão, estão os alimentadores que fazem parte das redes primárias de distribuição e vão alimentar as redes secundárias (BASSO, 2011). Apesar de ter essa função importante no sistema de potência, a tarefa mais importante da subestação é de assegurar a máxima segurança de operação e serviço a todas as partes componentes dos sistemas elétricos (ANEEL, 2019). Isso é feito pela disponibilidade de serem instalados equipamentos de manobra e proteção para assegurar que em condições de defeito o sistema esteja seguro.

Os subsistemas de distribuição primário são responsáveis por atender os médios consumidores e alimentar as redes secundárias. Os alimentadores podem ser classificados em principais, que são geralmente trifásicos, e laterais, que podem ser tanto monofásicos ou trifásicos que derivam do alimentador principal. Adicionalmente, tanto os alimentadores principais quanto os laterais podem fornecer energia para os consumidores de médio porte quanto alimentar o subsistema secundário de distribuição. A topologia do sistema de distribuição primária é em sua maioria radial e aérea (ANEEL, 2019).

Os subsistemas de distribuição secundária são os que atendem os pequenos consumidores. Alimentados pela rede de distribuição primária, os transformadores de distribuição, normalmente aéreo e localizado nos postes, convertem a média tensão da rede primária para baixa tensão, padronizadas em 380/220 V ou 220/127 V. De todos os sistemas do SEP, a rede secundária é a de menor comprimento, sendo assim, os transformadores são instalados sempre próximo aos centros de carga e possuem baixa potência nominal, geralmente entre 10 e 150 kVA. A topologia do sistema de distribuição secundária é predominantemente radial e aérea (ANEEL, 2019).

O sistema de distribuição engloba diferentes tipos de consumidores e cada um tem uma necessidade diferente. Conseqüentemente, os níveis de tensão são variáveis, mas seguem a seguinte definição:

- Alta Tensão (AT): tensão entre 69 kV e 230 kV. Os níveis de tensão padronizados para conexão são de 69 kV e 138 kV.

- Média Tensão (MT): tensão entre 1 kV e 69 kV. Os níveis de tensão padronizados para conexão são de 13,8 kV e 34,5 kV.
- Baixa Tensão (BT): tensão abaixo de 1 kV.

O nível de tensão que cada cliente irá consumir é diretamente relacionado à carga instalada segundo o Módulo 3 do PRODIST (2017, p. 10). Sendo assim, tem-se que consumidores serão conectados à rede de baixa tensão se a potência ativa instalada for inferior a 75 kW, para média tensão são os consumidores com potência ativa instalada maior que 75 kW e MUSD (Montante de Uso do Sistema de Distribuição) contratado inferior a 2500 kW, e para consumidores serem ligados à alta tensão o MUSD tem que ser superior a 2500 kW (ANEEL, 2015).

A ANEEL define limites de tensões ideais para os consumidores e concessionárias. A tensão contratada pela concessionária é a tensão nominal do sistema, mas essa pode variar numa faixa entre 95% da nominal e 105%. Para sistemas de distribuição, tanto primário quanto secundário, com tensão nominal igual ou inferior a 69 kV, a qualidade da tensão de atendimento será classificada segundo o Quadro 2:

Quadro 2 – Classificação dos níveis de tensão medidos

Classificação da Tensão De Atendimento	Faixa de Variação da Tensão de Leitura
Adequada	$0,95 T_{nom.} \leq T_{leit.} \leq 1,05 T_{nom.}$
Precária	$0,93 T_{nom.} \leq T_{leit.} < 0,95 T_{nom.}$
Crítica	$0,80 T_{nom.} \leq T_{leit.} < 0,93 T_{nom.}$ ou $T_{leit.} > 1,05 T_{nom.}$

Fonte: ANEEL (2018b).

Nota: Adaptado pelo autor.

Para as tensões de leitura abaixo do valor de 80% do valor da tensão contratada sem a ocorrência de interrupção durante o período de observação, são consideradas como uma interrupção de fornecimento pela ANEEL.

4.2.2 Fluxo de Potência

Fluxo de potência é um problema matemático em que o objetivo é determinar as tensões e potências em todos os barramentos de um sistema elétrico. Em sistemas de muitas barras, os problemas de fluxo de potência não são lineares e devem ser resolvidos por meio de métodos numéricos. Dessa forma pode-se dimensionar linhas de transmissão, transformadores e demais equipamentos que farão parte do sistema de modo a manter os padrões adequados de tensão e frequência (ROCHA, 2010).

Os barramentos que constituem o fluxo de potência de um sistema podem ser classificados basicamente em três divisões (ROCHA, 2010):

- Barramento de Carga (P, Q): Os parâmetros conhecidos são a potência ativa (P) e reativa (Q) da barra, porém o módulo (V) e o ângulo da tensão (δ) são desconhecidos.
- Barramento de Geração (P, V): Os parâmetros conhecidos são a potência ativa (P) e o módulo da tensão (V), porém a potência reativa (Q) e o ângulo de tensão (δ) são desconhecidos.
- Barramento de Referência (V, θ): O módulo (V) e o ângulo da tensão (δ) são conhecidos, mas as potências ativa (P) e reativa (Q) são desconhecidas.

Inicialmente, para solução o problema de fluxo de potência, os barramentos são classificados quanto a divisão acima, sendo que há apenas um barramento de referência (V, θ) no sistema enquanto os outros barramentos podem ser tanto de carga quanto de geração. Os barramentos que contenham geradores acoplados não implicam necessariamente num barramento de geração, a classificação ainda assim dependerá dos parâmetros conhecidos. Assim, caso um barramento tenha um gerador acoplado ele será classificado em barramento de geração se a potência ativa e o módulo da tensão forem conhecidos ou barramento de carga se a potência ativa e reativa forem conhecidas. Adicionalmente, barramentos que sirvam somente de conexão entre outros barramentos, módulo e ângulo de tensão desconhecidos e não possuam geradores ou cargas acopladas serão considerados barramento de carga (P, Q) com as potências ativa e aparente nulas (ROCHA, 2010).

A configuração do sistema de potência é suposta inalterável. Como o objetivo é determinar os módulos e ângulos de todas as tensões em todos os barramentos é vital que as variações de carga, tensão e frequência sejam desprezíveis com a variação do tempo. Uma vez tendo as impedâncias e tensões do sistema, pode-se determinar as perdas no sistema bem como o fluxo de potência em cada linha ou transformadores (ROCHA, 2010).

5 METODOLOGIA E ETAPAS DO DESENVOLVIMENTO

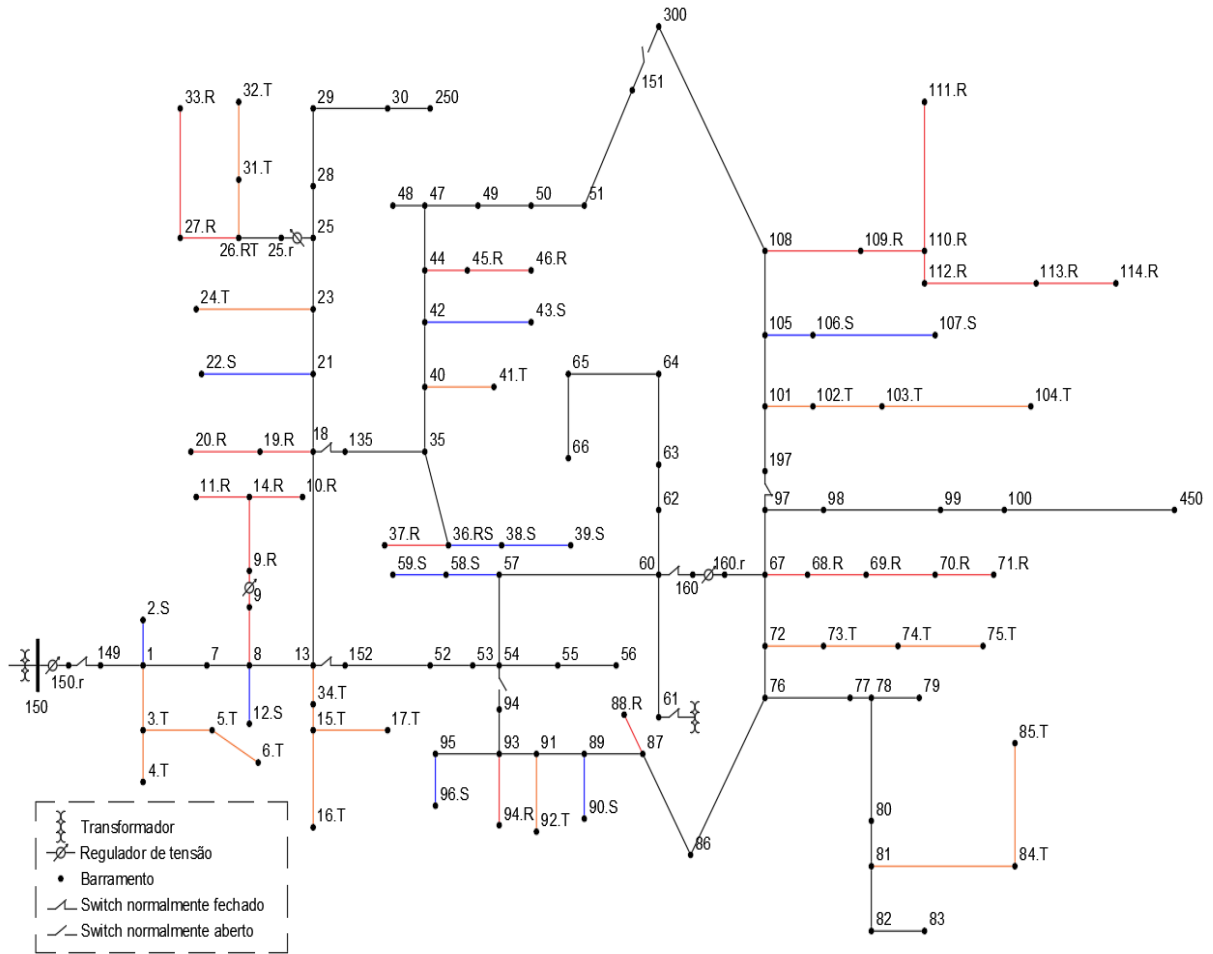
A pesquisa trata-se de uma análise quali-quantitativa e que será analisado as principais consequências que o acréscimo de veículos elétricos causa nos sistemas de distribuição. O método utilizado para validar a pesquisa é o comparativo de cunho descritivo, onde serão apresentados dois cenários e suas particularidades. Nesta sessão será apresentado os processos feitos para alcançar o objetivo final do trabalho. Primeiramente, será necessário coletar os dados básicos do embasamento teórico e tratá-los para definir os veículos elétricos como uma carga pontual, definir suas curvas de carga, quantidade de veículos adicionados ao sistema e seus pontos de inserção. Após essa etapa, todos os dados coletados e tratados anteriormente serão traduzidos em código para serem simulados pelo programa *OpenDSS*. Para finalizar, serão simulados dois cenários diferentes, o primeiro sem a adição dos veículos elétricos e outro com a adição da frota de veículos elétricos em um bairro genérico na cidade de Vitória para avaliar as consequências do novo cenário e as possíveis soluções a serem tomadas para contornar os efeitos negativos.

O programa *OpenDSS* foi escolhido para a simulação do sistema de distribuição por ter uma licença de código aberto e é indicado e utilizado pela ANEEL para cálculo de fluxo de carga. Dentre suas vantagens, o *OpenDSS* é customizável via programação e é expansível, podendo realizar modificações definidas pelo usuário. Com isso, o programa acabou abrindo a possibilidade de que novos recursos fossem adicionados de modo a ajudar as pesquisas e o desenvolvimento de soluções. Para o trabalho aqui desenvolvido, o *script* do sistema encontra-se desenvolvido pelo *OpenDSS* enquanto o programa *MatLab* é utilizado para recursos analíticos externos, formas gráficas e exibição de resultados (ARAÚJO; EICHENBERGER, 2015).

Para modelar o sistema de distribuição foi-se utilizado o *IEEE 123 nodes test feeder* (IEEE, 1992). Esse modelo simula uma rede de distribuição de um alimentador com 123 barras e é amplamente utilizado, facilitando inclusive comparação entre diferentes trabalhos. A vantagem do sistema de 123 barras é ter uma resposta muito próxima de sistemas reais quando quaisquer tipos de modificações são adicionados à rede. Apesar de usar um sistema genérico para representar um sistema de distribuição, algumas considerações se fazem necessárias para a coerência das simulações dos cenários. A tensão de base do sistema é de

4,16 kV, que não é padronizada, e não segue a tensão de distribuição primária da rede da cidade de Vitória. Optou-se por manter as bases de sistema e, mesmo os resultados não apresentando valores absolutos reais, as apresentações dos dados são analisadas em p.u., gerando análises satisfatórias para o projeto. A Figura 4 ilustra a topologia do sistema de distribuição simulado.

Figura 4 – Sistema da rede de distribuição



Fonte: Produzido pelo próprio autor.

Para alcançar o objetivo final do projeto, analisa-se alguns parâmetros da rede que podem ser prejudicados com a inserção de cargas de maneira descontrolada. A principal consequência desse tipo de mudança é haver perdas tão grande devido ao aumento não previsto de cargas que a o sistema não consiga manter os níveis de tensão dentro dos valores mínimos estipulados ao ponto de ocorrer o desligamento do sistema. Os parâmetros que serão comparados são perfil de tensão, carregamento das linhas e transformadores, fator de potência e as perdas de potência nos principais componentes do sistema. A simulação do projeto é

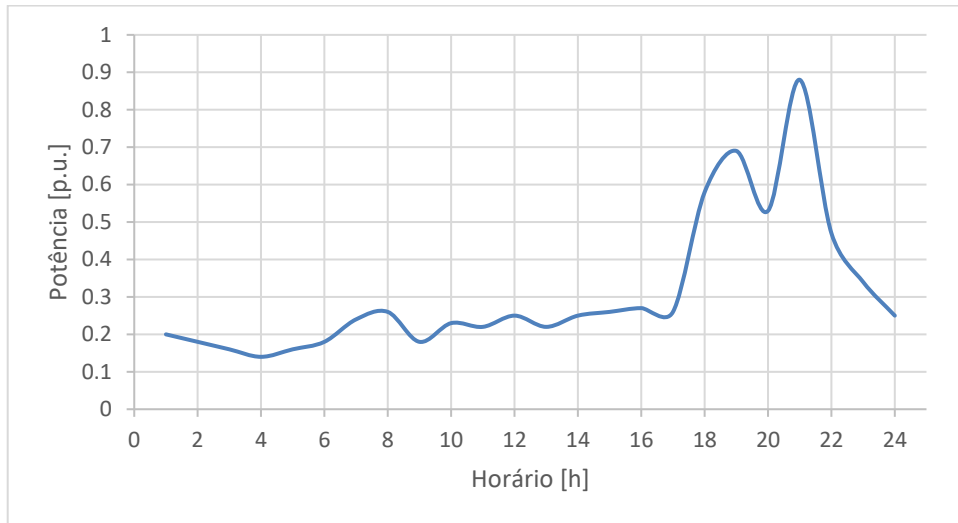
baseada na comparação entre dois cenários distintos: o cenário antes e depois da adição das novas cargas de veículos elétricos.

O primeiro cenário a ser estudado e simulado é o padrão das cargas presente nos *IEEE 123 test feeder*. Neste cenário foi aproveitado a topologia do sistema e as cargas já alocadas pelo próprio teste, assim, tem-se um cenário padrão para tomar como base e entender como a adição das cargas pode afetar o sistema. Aqui foram feitas as modificações da tensão de alimentação e potência das cargas para que ocorra a coerência com as cargas que serão adicionadas no segundo cenário.

O outro cenário a ser apresentado é o sistema com acréscimo dos veículos elétricos. Esse cenário emula uma possível realidade da sociedade com o aumento da frota de veículos elétricos e avanços na tecnologia. A tendência seria de que os veículos elétricos substituíssem aos poucos a frota de veículos a combustão. Os veículos aqui apresentados são puramente elétricos e *plug-in* para facilitar na criação do cenário. O problema dessa nova realidade é a conexão descontrolada dos veículos *plug-in* no sistema elétrico durante o horário de pico (ARAÚJO; EICHENBERGER, 2015), adicionando uma carga extra no período de maior uso da rede e esta não está preparada para comportar esse tipo de perfil de carga na maioria das vezes. Assim, é feita uma análise comparativa entre os dois cenários.

No sistema são implementados quatro diferentes tipos de carga: as cargas residenciais e comerciais são as que já se encontravam anteriormente no simulador de 123 barras e os dois modelos de cargas dos veículos elétricos que serão apresentados adiante. A curva de carga das cargas residenciais e comerciais foram criadas a partir da dinâmica de cada grupo (BASSO, 2011). Assim, a simulação poderá representar o estado do sistema de distribuição durante um dia de semana completo podendo ser selecionado qual o horário de interesse de estudo.

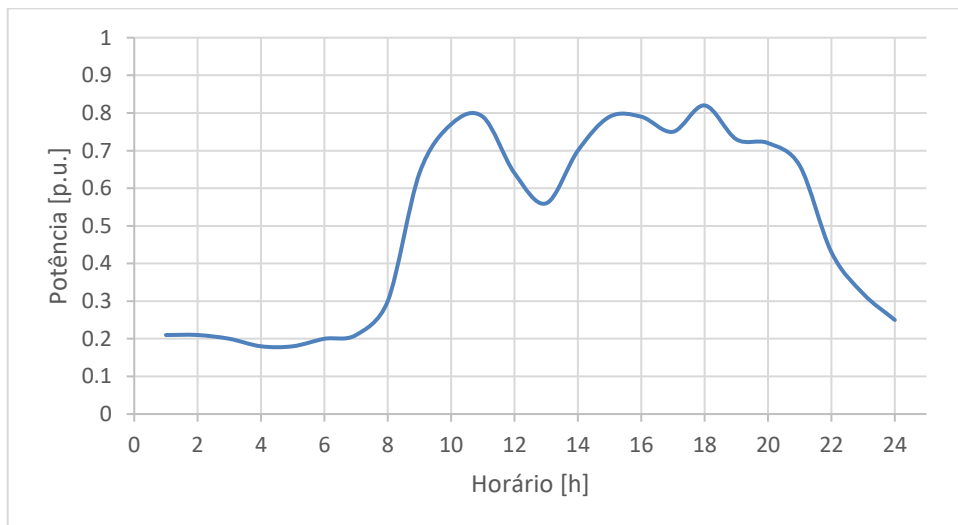
Gráfico 2 – Curva de carga residencial



Fonte: ANEEL (2019).

Nota: Adaptado pelo autor.

Gráfico 3 – Curva de carga comercial



Fonte: ANEEL (2019).

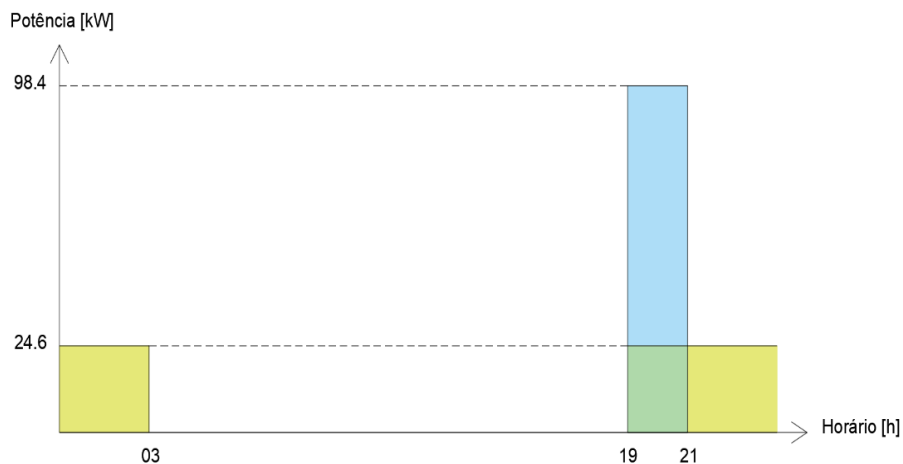
Nota: Adaptado pelo autor.

Para modelar os veículos elétricos como carga utilizou-se da informação fornecida pela própria montadora dos veículos (artigo do menino sobre VE e consumo) de que, em média, os modelos de veículos elétricos como Renault ZOE (modelo utilizado como referência), BMW i3 e Soul EV da KIA possuem um consumo médio de 3 MWh por ano. Considerando que não há distinção entre o uso dos carros durante semana e final de semana, pode-se traduzir esse consumo para uma média de 8,2 kWh por dia (ARAUJO; EICHENBERGER, 2015). Segundo o Quadro 1 apresentada na seção 4.3, que mostra a relação entre o tempo de carga e a tomada

utilizada para recarregar o veículo, foi-se montado dois modelos de veículos elétricos: um utilizando uma tomada bifásica de 32 A para 8 horas de recarga e outro utilizando uma tomada trifásica de 63 A para 2 horas de tempo de recarga (SANTOS, A. C. F. R.,2017).

Para cada um dos dois modelos criados foram associados uma curva de carga baseado no tempo de recarga do carro e no tempo em que possivelmente cada habitante que possuir o veículo elétrico iria pôr o veículo para carregar. Assim, foram criadas duas curvas de carga do tipo degrau onde o valor unitário se refere ao veículo sendo carregado e zero sendo o veículo completamente carregado ou desligado da rede. O tempo inicial dos dois modelos é definido como sendo as 19 horas pois é o período em que a maioria dos habitantes começam suas atividades residenciais. Segundo a EDP Escelsa, concessionária de distribuição de energia do Espírito Santo, o horário de maior consumo se caracteriza em ser após as 18 horas e se estende até as 21 horas, então, por motivos de facilidade para o modelo de carga e de uma maior quantidade de pessoas já retornaram para suas casas, optou-se pelas 19 horas para o início da recarga dos veículos. O Gráfico 4 ilustra a curva de carga dos dois modelos implementados.

Gráfico 4 – Curvas de carga dos modelos de VE



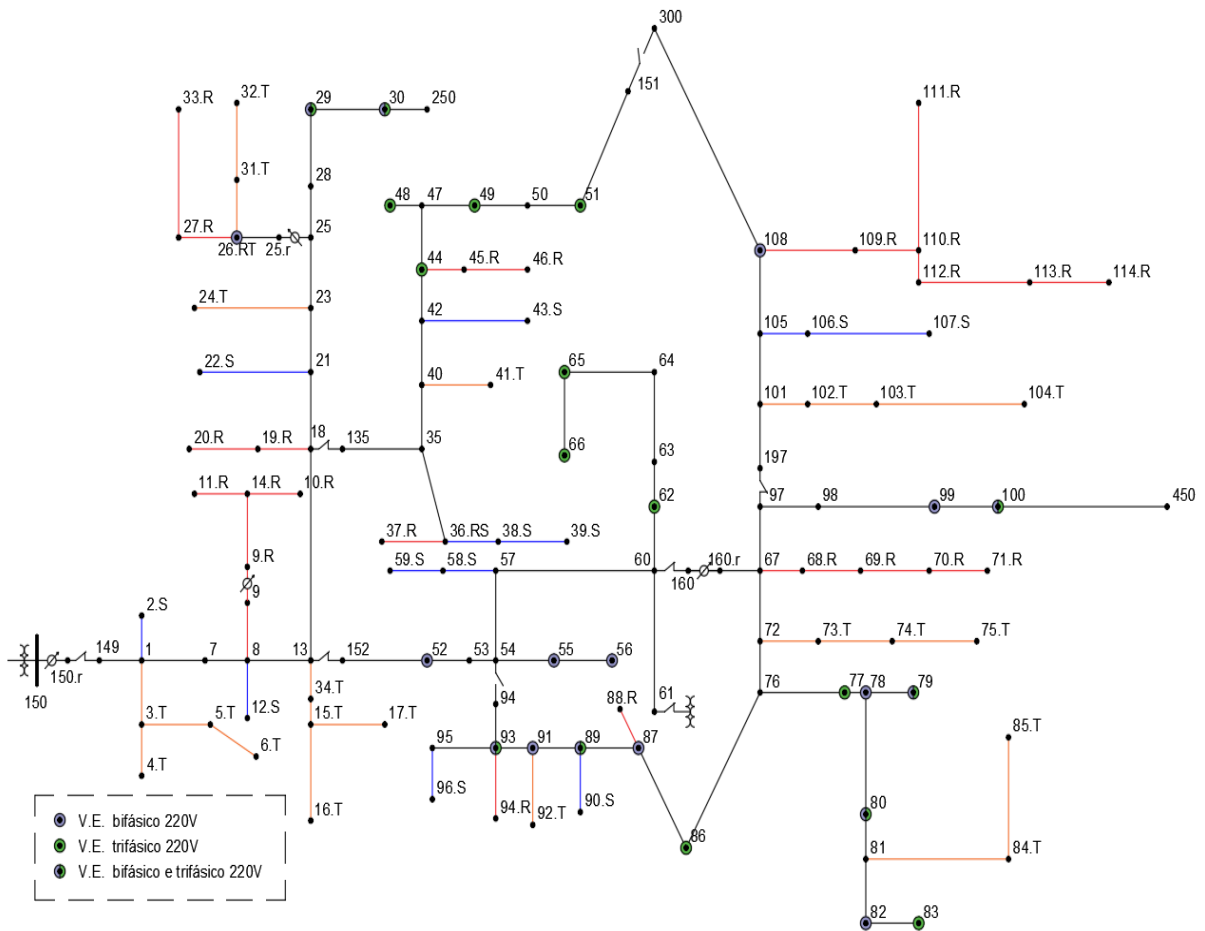
Fonte: Produzido pelo próprio autor.

A quantidade de veículos elétricos adicionadas no segundo cenário foi calculada baseada na expectativa do crescimento da frota de veículos elétricos no Brasil e de dados do DETRAN-ES sobre a quantidade de veículos da cidade de Vitória. Segundo o presidente da *Bright Consulting*, Paulo Cardamone, estimasse que a frota de veículos elétricos no Brasil, tanto puramente elétrico quanto híbrido, seja de 4,4% até o ano de 2025 (UOL, 2019). A cidade de

Vitória possui 121 mil automóveis segundo o relatório anual de estatística de trânsito do DETRAN-ES (2018, p. 3). Sendo assim, pode-se fazer uma estimativa de que a cidade de Vitória teria uma frota de aproximadamente 5366 veículos elétricos. Entretanto, o sistema de 123 barras comporta apenas um alimentador. Considerando que existem, em média, 2 alimentadores por bairro e existem 80 bairros na cidade, o número de veículos elétricos adicionados no sistema para a simulação é de 34 veículos. Adicionalmente, houve uma divisão de metade desses veículos serem do modelo bifásico e a outra metade trifásico.

A alocação dos pontos de conexão dos veículos elétricos segue o padrão da linha de transmissão. Sendo assim, os veículos que possuem conexão trifásica só foram conectados nos pontos da rede onde era possível fazer modelo de conexão. Já as outras cargas, por solicitar 220 V de tensão, foram conectadas em pontos da rede que apresentassem no mínimo uma conexão bifásica. Por tanto, a alocação das cargas novas é ilustrada na Figura 5.

Figura 5 – Curvas de carga dos modelos de VE



Fonte: Produzido pelo próprio autor.

Para finalizar as análises, os testes realizados no sistema foram as curvas de tensão de cada fase em os barramentos, o carregamento das linhas e dos transformadores, e o fator de potência do sistema de distribuição. As curvas de tensão e as curvas de carregamento de linhas e transformadores foram selecionados para ser apenas uma fase por *plot* por que, visto a quantidade de elementos do circuito, foi mais simples de comparar a diferença entre os dois cenários, além de que a adição das cargas foram feitas de forma desequilibrada, ou seja, cada fase do sistema recebeu uma carga diferente. O fator de potência é analisado logo na saída do alimentador. Apesar do sistema ser desequilibrado, por ser apenas um elemento é mais fácil de extrair a informação e comparar a diferença entre os dois cenários.

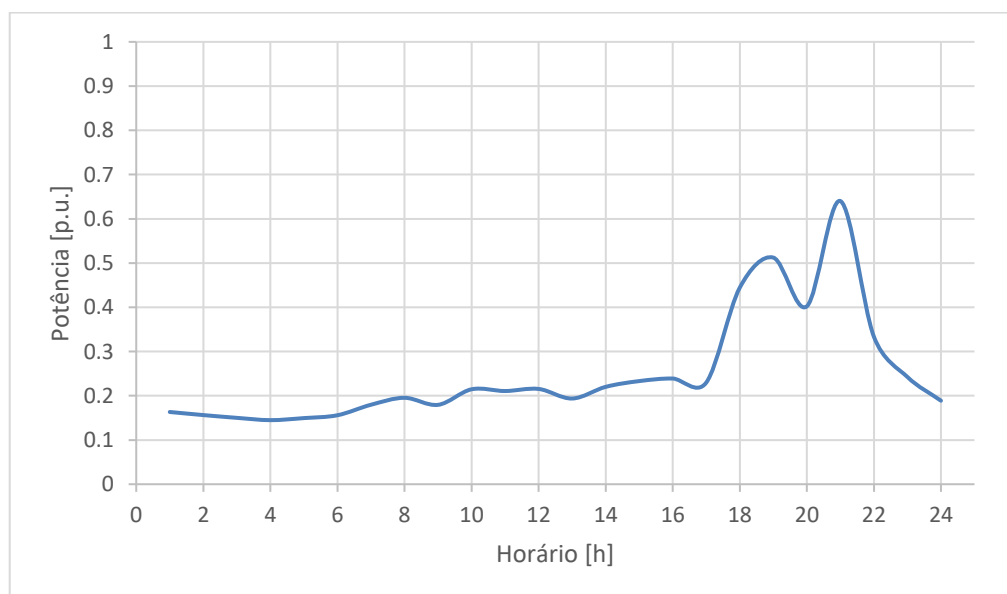
6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após apresentar cada cenário e seus pontos relevantes, foram feitas coletas de resultados para futura comparação após a simulação pelo *software OpenDSS*. O principal problema a ser explorado aqui é a coincidência do carregamento desordenado dos veículos elétricos com o horário de ponta do sistema de distribuição. Então, são apresentados e discutidos nessa seção a potência do sistema, o perfil de tensão e o carregamento dos transformadores. Os resultados aqui mostrados são analisados baseados nas normas do PRODIST, sendo os mais utilizadas os Módulo 7, sobre cálculo de perdas na distribuição, e Módulo 8, sobre qualidade da energia elétrica.

6.1 Potência do Sistema

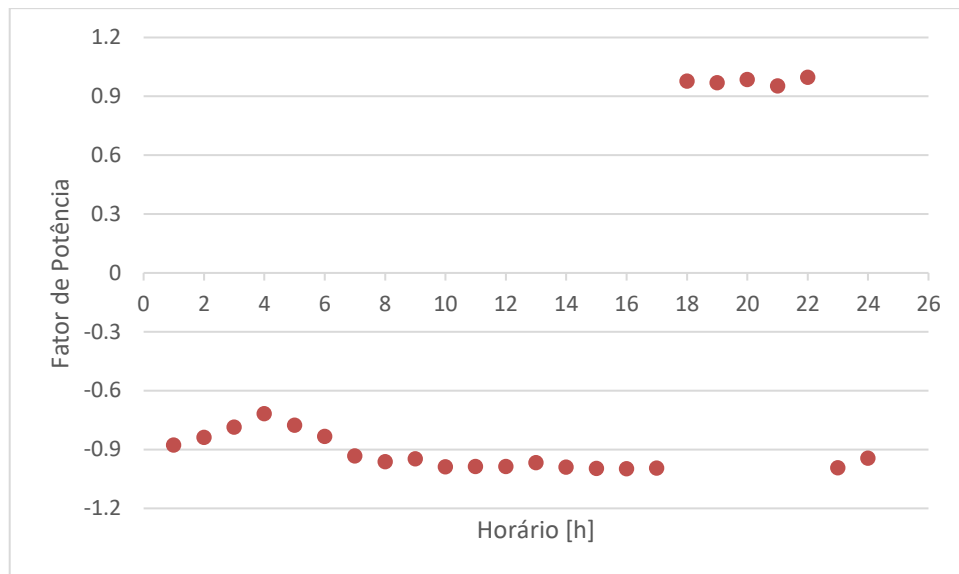
As potências do sistema mostradas aqui têm como objetivo ilustrar o que cada cenário exige da rede em termos de potência. A partir o fluxo de potência, foram coletadas as potências no ramal de entrada e o fator de potência do sistema em todos os horários a fim de construir a curva de carga do sistema. Os gráficos a seguir representam os cenários definidos anteriormente, sendo que as curvas de carga têm como base a potência aparente do alimentador de 5 MVA.

Gráfico 5 – Curva de carga do sistema sem veículos elétricos



Fonte: Produzido pelo próprio autor.

Gráfico 6 – Fator de Potência do sistema sem veículos elétricos



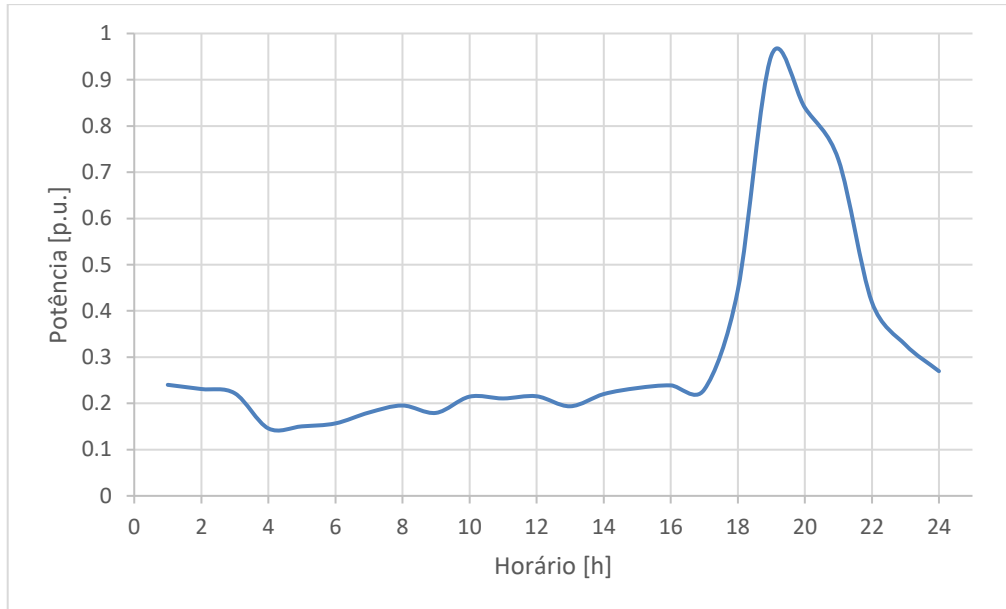
Fonte: Produzido pelo próprio autor.

Ao analisar os gráficos, percebe-se que a maior parte das cargas possuem características residenciais devido à elevação da carga perto do horário de ponta. Ao analisar somente a curva de carga do sistema, pode-se inferir que o transformador do alimentador está superdimensionado para o sistema acima e deve ser avaliados métodos econômicos e técnicos para sua substituição. Assim, baseado na vida útil esperada do equipamento, é possível a substituição do equipamento por outro de menor potência que atenda a necessidade do sistema e seja mais barato do que o transformador instalado.

O fator de potência do circuito apresentou resultados que devem ser tratados a fim de melhorar a qualidade de energia do sistema. A maior parcela do dia temos fatores de potência acima do valor 0,92, que é o valor de referência para o sistema em estudo. Porém, percebe-se que a predominância do fator de potência é capacitiva. Isso indica que há excesso de potência reativa capacitiva sendo injetado por bancos de capacitores quando não há necessidade. Visando não pagar por excesso de reativos, o fator de potência do sistema de distribuição deve ser no mínimo 0,92 capacitivo no intervalo entre as 24 horas e 30 minutos até as 6 horas e 30 minutos, e no período complementar, o fator de potência deve ser no máximo 0,92 indutivo. Portanto, visando adequar o cenário acima, é indicado fazer com que o banco capacitivo instalado no sistema tenha uma conexão automática, em que esta monitora a rede elétrica e verifica o momento em que a rede necessita da injeção de reativos no sistema, ou

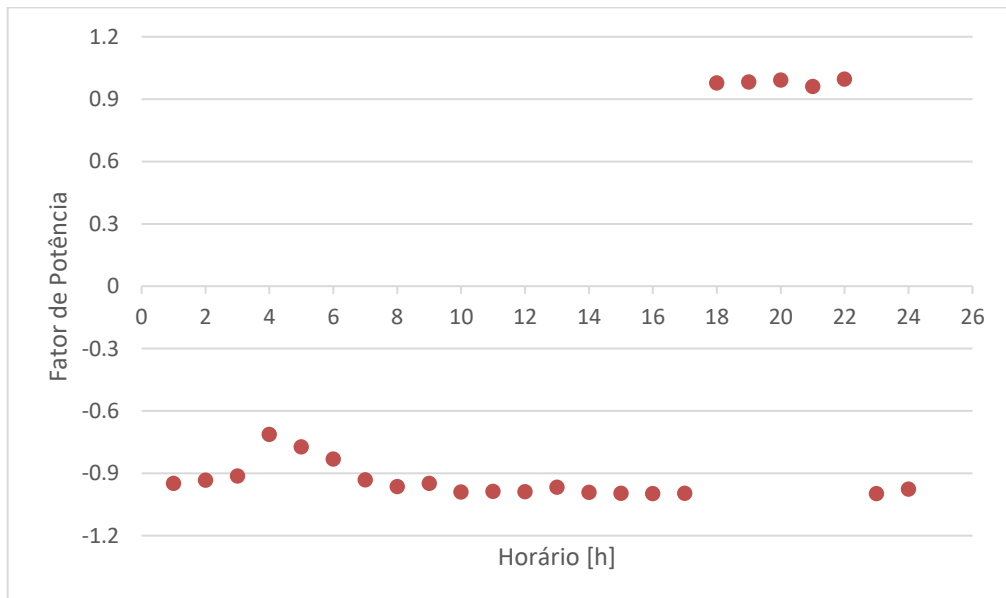
por pelo menos uma montagem programável, em que pode ser definido os horários em que os bancos de capacitores são ligados à rede.

Gráfico 7 – Curva de carga do sistema com veículos elétricos



Fonte: Produzido pelo próprio autor.

Gráfico 8 – Curvas do sistema com veículos elétricos



Fonte: Produzido pelo próprio autor.

Com a mudança para o novo cenário, percebe-se que o carregamento do transformador está mais próximo do valor nominal no horário de ponta, porém, ainda assim continua

superdimensionado para o sistema. Assim, como na análise anterior, a melhor ação seria a substituição do equipamento por um outro que esteja mais bem projetado para atender o sistema.

O fator de potência no segundo cenário também se encontra melhor em comparação ao primeiro, porém, ainda há modificações necessárias a serem feitas. Seria necessário ter um controle melhor de quando injetar reativos na rede. Em ambos os casos se percebe que há excesso de reativos capacitivos. As possíveis soluções são saber verificar quando a rede necessita de reativos capacitivos para correção do fator de potência ou uma correção no valor da capacitância dos bancos já instalados. Entretanto, esse último seria o menos recomendado pois não oferece a flexibilidade do outro método caso o sistema expanda.

Em uma visão geral, a nova curva de carga pode receber alguns tratamentos para minimizar o efeito do carregamento desordenado dos veículos elétricos. Existem três modelos de carregamento coordenado que ajudam a reduzir a demanda elevada nos horários de ponta: carregamento com deslocamento de pico, preenchimento de vale e corte de pico.

O carregamento coordenado com deslocamento de pico tem como ideia principal a utilização do método BSS ou o carregamento consciente dos usuários. Assim, os veículos residenciais ou as baterias descarregadas extraídas pelo aluguel seriam carregados em horário de menor demanda, garantindo que não seja necessário o aumento da capacidade de geração. Entretanto, para esse método ter sucesso, seria necessário a participação ativa dos consumidores residenciais e dos proprietários das baterias coletadas que deveriam fazer a recarga durante períodos mais convenientes para a rede, o que não coincide com o período mais conveniente para os proprietários dos veículos (CORRÊA, 2018).

O carregamento coordenado com preenchimento de vale é uma otimização do modelo anterior. Ao invés de contar com a presença ativa para o carregamento em horários convenientes para a rede, este processo, por sua vez, consiste em estações de carregamento que operam de modo a escalar grupos de veículos a carregarem durante o período de menor demanda. O modelo anterior ainda coincide as cargas adicionais para carregarem juntas, porém, num período de mens demanda. Entretanto, o preenchimento de vale escala grupos de veículos de modo a usar todo o período de menor demanda para carregar todos os veículos. A

desvantagem desse processo é aumento da complexidade do modelo que necessita de uma infraestrutura de comunicação, sensores e algoritmos para sua implementação. Adicionalmente, esse modelo pode também não ser bem recebido pelos usuários pois eles não terão domínio sobre o carregamento de sus veículos (CORRÊA, 2018).

O último método é o corte de vale. Este método é uma variação do método anterior com a adição do conceito *vehicle-to-grid*, V2G, em que os veículos elétricos participam do sistema como um gerador nos horários de ponta. Os carregadores veiculares apresentam fluxo bidirecional de energia contribuindo para o que é conhecido como geração distribuída de energia. Assim, durante os períodos de maior demanda, esses veículos iriam contribuir com uma geração extra de energia e durante o período de menor demanda, estes seriam recarregados (CORRÊA, 2018). Portanto, a adição dos veículos elétricos passa a ser um impacto positivo para o sistema pois localmente eles ajudam tanto para o controle de tensão, frequência e fator de potência quanto para aliviar o sistema nos momentos de maior necessidade (MARQUES, 2015).

Todos os métodos apresentados acima visam melhorar o problema do pico de demanda em horário de ponta. A implementação de cada um depende do *trade-off* de fatores econômicos, comportamentais e grau de complexidade que os usuários estão dispostos a perder. O primeiro modelo é uma boa solução para o problema no horário de ponta, mas acaba sendo impraticável devido à execução do modelo. A princípio o modelo de corte e pico seria o mais interessante pois o uso da rede seria mais uniforme durante todo o dia e aumenta a qualidade da energia para todos os consumidores. Porém, sua implementação se torna custosa e de pouco acesso para alguns usuários. Para incentivar o uso desse modelo, as concessionárias devem oferecer créditos ou descontos para os usuários que possuem essa tecnologia instalada.

6.2 Carregamento dos transformadores

O acréscimo de carga que o segundo cenário adiciona na rede tende a sobrecarregar alguns componentes do sistema, como os transformadores. Como visto na seção anterior, o transformador do alimentador teve sua taxa de carregamento alterada, mudando o padrão de energia solicitada para suprir o novo sistema. Assim, optou-se por fazer uma análise do carregamento de todos os transformadores reguladores do sistema e analisar sua taxa de

carregamento e fator de potência dos horários de 19 e 21 horas. O Quadro 3 ilustra as características de cada cenário do alimentador de 5 MVA do sistema.

Quadro 3 – Potência elétrica no barramento de entrada do sistema

	P [kW]	Q [kvar]	S [kVA]	<i>fp</i>	Taxa de Carregamento
19h	2481,8	633,8	2591,4	0,969	0,512
19h com VE	4681,5	857,4	4759,4	0,984	0,952
21h	3051,7	965,0	3200,6	0,954	0,640
21h com VE	3497,4	999,5	3637,4	0,962	0,727

Fonte: Produzido pelo próprio autor.

Segundo a NBR 5356:1993, que dispõe sobre transformadores de potência, os transformadores de potência trifásicos iguais ou inferiores a 100 MVA devem ter seus equipamentos auxiliares projetados para suportar um nível de carregamento de até uma vez e meia a potência nominal do transformador. Apesar de não projetar todos os transformadores para trabalhar nessa faixa de carregamento, espera-se que os transformadores instalados nos sistemas estejam com nível de carregamento próximos da sua capacidade nominal e podendo trabalhar em sobrecarga em pequenos intervalos de tempo. Esse comportamento reduz a vida útil do equipamento, mas é esperado que o transformador tenha vida útil entre 15 e 20 anos, apresentando melhor relação econômica e ainda uma possível previsão da expansão do sistema (CARDOSO, 2005). Então, conclui-se que o transformador do alimentador pode ser substituído por um outro mais bem projetado para se adequar ao valor de potência do sistema e que seja mais econômico ao analisar o custo e o tempo de vida.

O fator de potência do sistema é o outro parâmetro de grande importância. Para a concessionária, o ideal é manter o valor do fator de potência o mais próximo da unidade possível pois assim, as perdas de potência nos ramos dos alimentadores devido à alta corrente

podem ser minimizadas por conta da redução de reativos. Analisando o Quadro 3, percebe-se que o fator de potência do sistema está dentro da faixa adequada.

Apesar do fator de potência geral do sistema estar na faixa dentro da faixa adequada, a maioria das cargas instaladas no sistema de distribuição são desequilibradas, e muitas vezes monofásicas e bifásicas. Conseqüentemente, o sistema possui diferentes fatores de potência em cada ramal. Como para unidades consumidoras com tensão inferior a 69 kV o fator de potência de deslocamento no ponto de conexão deve estar entre os valores de referência de 0,92 e 1,00 de acordo com o Módulo 3 do PRODIST (ANEEL, 2017, p. 28). Portanto, são apresentados os barramentos que possuem transformadores reguladores para analisar seu carregamento e fator de potência.

6.2.1 Barramento 9

O barramento 9 possui características próprias já adicionadas pelo próprio simulador *IEEE 123 test feeder* que serão mantidas antes e depois de das alterações dos cenários. Devido à natureza e especificidade das cargas dos veículos elétricos determinados, não foram adicionados nenhum dos dois modelos a esse barramento por ser um ramal monofásico. Assim, podemos comparar o que os novos cenários contribuem para esse barramento de forma indireta. O transformador do barramento possui potência nominal de 2 MVA e está conectado à fase R do sistema. O Quadro 4 apresenta as características do regulador do barramento 9.

Ao analisar os dados acima, percebe-se primeiramente que o transformador está superdimensionado para o circuito a ser alimentado. Mesmo tendo em vista que os sistemas de distribuição devem proporcionar possíveis expansões do sistema, uma taxa de carregamento tão baixa indica que poderia ter sido escolhido outros transformadores mais baratos que ainda iriam atender as necessidades do sistema. A princípio, um transformador deveria ter uma vida útil de 20 anos. Considerando que durante esse período o sistema deveria expandir ao ponto em que carga de 59 kVA aumentasse para próximo dos 2 MVA provavelmente o transformador já deveria ter passado o seu tempo de vida útil e um transformador de menor potência iria suprir as mesmas necessidades do sistema por um custo muito menor. Para o dado circuito do barramento 9 estar dentro da faixa de carregamento

mais econômico, o transformador deveria ser substituído por um de 45 kVA (SILVA; FIGUEIREDO, 2004). Assim este iria trabalhar perto da carga nominal e com uma de sobrecarga temporária máxima de 35% nos horários de ponta.

Quadro 4 – Perfil de tensão da fase S às 19 horas sem adição de veículos elétricos

	Barramento	P [kW]	Q [kvar]	S [kVA]	<i>fp</i>	Taxa de Carregamento
19h	9.1r	41,4	20,7	46,3	0,894	0,023
19h com VE		41,6	20,8	46,5	0,894	0,023
21h		52,8	26,5	59,1	0,894	0,029
21h com VE		53,3	26,7	59,6	0,894	0,030

Fonte: Produzido pelo próprio autor.

Analisando o fator de potência do barramento 9 em todos as quatro situações, percebe-se que este não se encontra dentro dos padrões estipulados pela ANEEL, o que indica a necessidade da correção do fator de potência. Portanto, é necessário a instalação de capacitores nesse ramo para injetar reativos capacitivos na rede para compensar o efeito do excesso de reatância indutiva. Com isso, a própria potência aparente do sistema será reduzida, reforçando ainda mais que o transformador usado se encontra superdimensionado para atender a demanda do ramal.

6.2.2 Barramento 25

O barramento 25 já começa a experimentar o que o acréscimo das cargas do segundo cenário provoca no sistema. Esse barramento é um ramal bifásico de fases R e T e por isso já é possível adicionar veículos elétricos com a recarga de 8 horas. Como o regulador de tensão alimenta um ramal pequeno, a quantidade de veículos elétricos inseridos é reduzida, porém, a influência no circuito começa a se tornar mais visível. O barramento 25 possui dois

transformadores com potência de 2 MVA. O Quadro 5 apresenta as características do transformador do barramento 25.

Quadro 5 – Perfil de tensão da fase S às 19 horas sem adição de veículos elétricos

	Barramento	P [kW]	Q [kvar]	S [kVA]	<i>fp</i>	Taxa de Carregamento
19h	25.1r	27,6	13,8	30,9	0,894	0,015
19h com VE		39,9	20,8	45	0,887	0,023
21h		35,2	17,6	39,3	0,894	0,020
21h com VE		47,6	24,6	53,6	0,888	0,027
19h	25.3r	27,6	13,8	30,9	0,894	0,015
19h com VE		39,9	6,8	40,5	0,986	0,020
21h		35,2	17,6	39,4	0,894	0,020
21h com VE		47,5	10,7	48,7	0,976	0,024

Fonte: Produzido pelo próprio autor.

Assim como no regulador do barramento anterior, percebe-se que a taxa de carregamento do transformador se encontra muito baixa. A solução para esse problema é a mesma, substituição dos transformadores de 2 MVA para um que se encaixe melhor às necessidades do ramal que ele alimenta. Portanto, seria recomendado, analisando a faixa de carregamento mais econômica, substituir os transformadores do barramento 25 por dois de 45 kVA, onde estes iriam trabalhar em sobrecarga temporária de no máximo 20% apenas no horário de ponta e nos outros horários com carga abaixo da nominal (SILVA; FIGUEIREDO, 2004).

Um outro parâmetro importante a ser notado é o fator de potência do ramal. Apesar de existirem momentos em que o fator de potência está dentro da faixa adequada, os momentos em que isso foi possível foram nos horários de carga pesada, ou seja, ocorrem numa pequena parcela do dia. Portanto, a correção do fator de potência se faz necessário. Assim, seriam necessários dois capacitores devidamente projetados para cada uma das duas fases para injetar na rede a quantidade necessária de reativos capacitivos.

6.2.3 Barramento 160

O último regulador que será analisado será o do barramento 160. Diferentemente dos outros, esse é o que mais sente as mudanças dos cenários pois boa parte do sistema que presencia a adição das cargas estão ligadas nos ramos desse regulador. O transformador do barramento 160 é trifásico composto por três transformadores monofásicos de 2 MVA ligados em estrela-estrela. Assim, o Quadro 6 apresenta as características do regulador nesse barramento.

Diferentemente dos outros reguladores, esse transformador apresenta fator de potência negativo. Isso ocorre pois nos barramentos 88, 90 e 92 possuem capacitores monofásicos e no barramento 83 existe um banco de capacitores trifásicos para ajudar na regulação do fator de potência contribuindo com potência reativa capacitiva para a rede. Percebe-se que todos os valores estão bem próximo da unidade, o que se pode concluir que não há a necessidade de correção o fator de potência em nenhum cenário.

Por último, foi analisado o fator de carregamento do regulador. O transformador desse barramento, apesar de mais carregado que os anteriores, ainda se encontra superdimensionado para o sistema. Assim, seria necessário substituir os três transformadores do barramento 160. Seguindo a norma, seria recomendado substituir os transformadores das fases S e T por dois monofásicos de 500 kVA, que trabalham com sobre carga temporária de no máximo 35% no horário de ponta, e um transformador monofásico de 750 kVA para a fase R, que se encontra mais carregada e os transformadores anteriores estariam muito próximo da capacidade máxima de carregamento recomendado para um transformador.

Quadro 6 – Perfil de tensão da fase S às 19 horas sem adição de veículos elétricos

	Barramento	P [kW]	Q [kvar]	S [kVA]	<i>fp</i>	Taxa de Carregamento
19h	160.1r	391,2	-64,6	396,5	-0,987	0,198
19h com VE		730,3	-77,4	734,4	-0,994	0,367
21h		498,9	-8,2	499	-0,999	0,250
21h com VE		573,6	-23,4	574,1	-0,999	0,287
19h	160.2r	292,5	-93,2	307	-0,953	0,154
19h com VE		670,7	-92,4	677	-0,991	0,339
21h		372,8	-45	375,5	-0,993	0,188
21h com VE		485,7	-53,4	488,6	-0,994	0,244
19h	160.3r	316,8	-95,4	330,8	-0,958	0,165
19h com VE		666	-65,1	669,2	-0,995	0,335
21h		403,1	-46,4	405,8	-0,993	0,203
21h com VE		491	-26,5	491,7	-0,999	0,246

Fonte: Produzido pelo próprio autor.

6.3 Perfil de Tensão

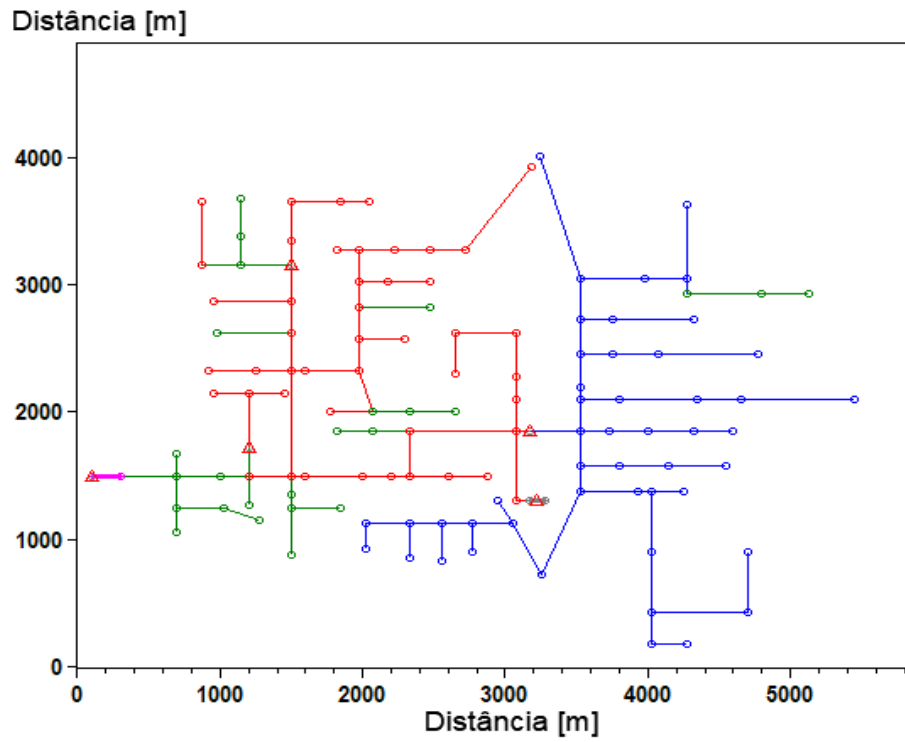
O perfil de tensão é apresentado para facilitar a visualização do comportamento do nível de tensão nos barramentos. Abaixo, são apresentados os níveis de tensão média através de todos os barramentos do sistema, e, logo depois, o perfil das tensões dos barramentos separados por fases em relação à sua distância ao alimentador. Os gráficos de perfil de tensão são apresentados entre os limites de 1,05 p.u. e 0,95 p.u. Optou-se por representar os dados dessa maneira pois esses valores são os limites de tensões adequadas para a rede de distribuição, facilitando assim, a análise imediata das tensões.

Ao serem comparados, é fácil identificar os pontos onde necessitam mais do alimentador e dos reguladores de tensão, e onde são os possíveis locais que poderão ser uma fonte de problemas. Para facilitar a interpretação dos resultados, os diagramas de tensão média nos barramentos seguem o seguinte código de cores:

- Tensões acima de 1,02 p.u. serão representados em azul.
- Tensões entre 1,00 e 1,02 p.u. serão representados em verde.
- Tensões abaixo de 1,00 p.u. serão representados de vermelho.

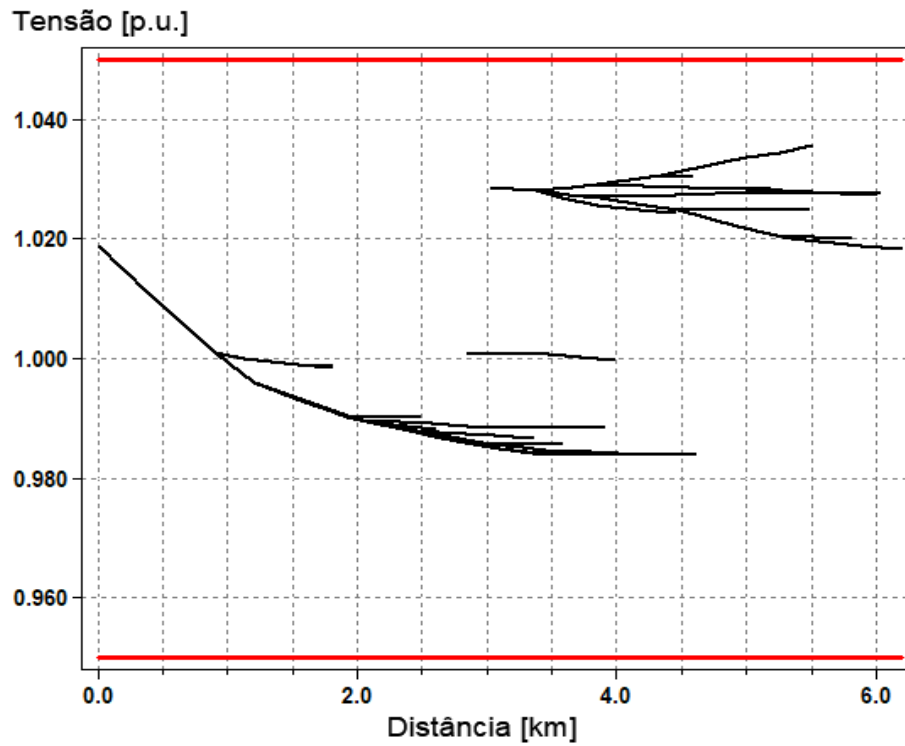
Os gráficos do perfil de tensão apresentados são bons parâmetros qualitativo para visualizar a particularidade que cada cenário adiciona à rede. Para os gráficos dos perfis de tensão, as tensões nas fases R, S, T são representadas por preto, vermelho e azul, respectivamente. Seguindo as regulamentações da ANEEL, os dados são mostrados dentro dos limites adequados de transmissão para facilitar a comparação dos resultados.

Figura 6 – Tensão média nos barramentos do sistema às 19 horas sem adição de veículos elétricos



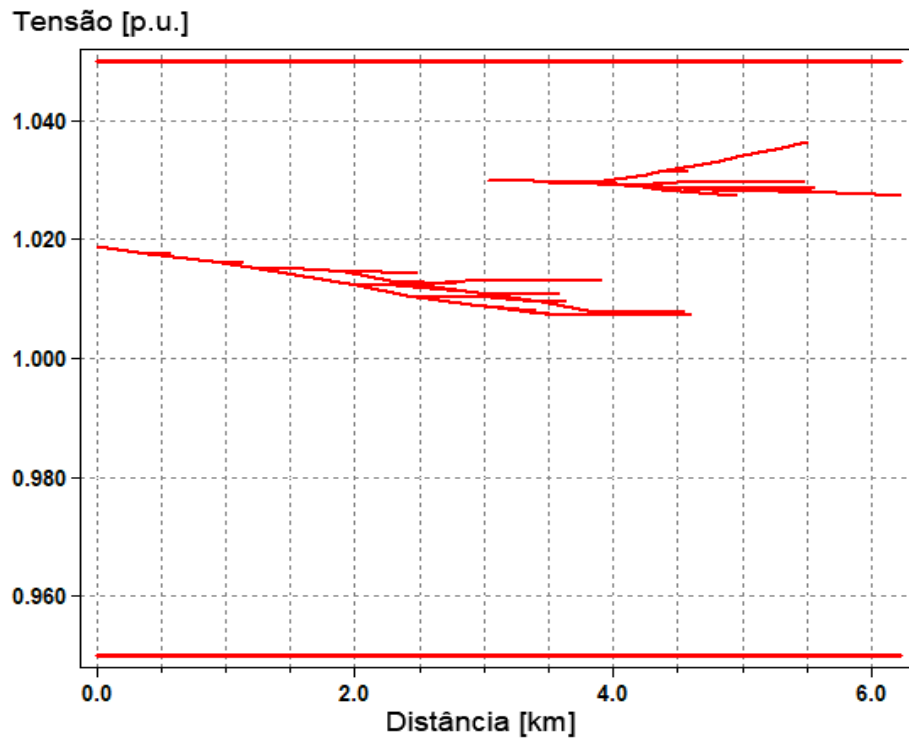
Fonte: Produzido pelo próprio autor.

Gráfico 9 – Perfil de tensão da fase R às 19 horas sem adição de veículos elétricos



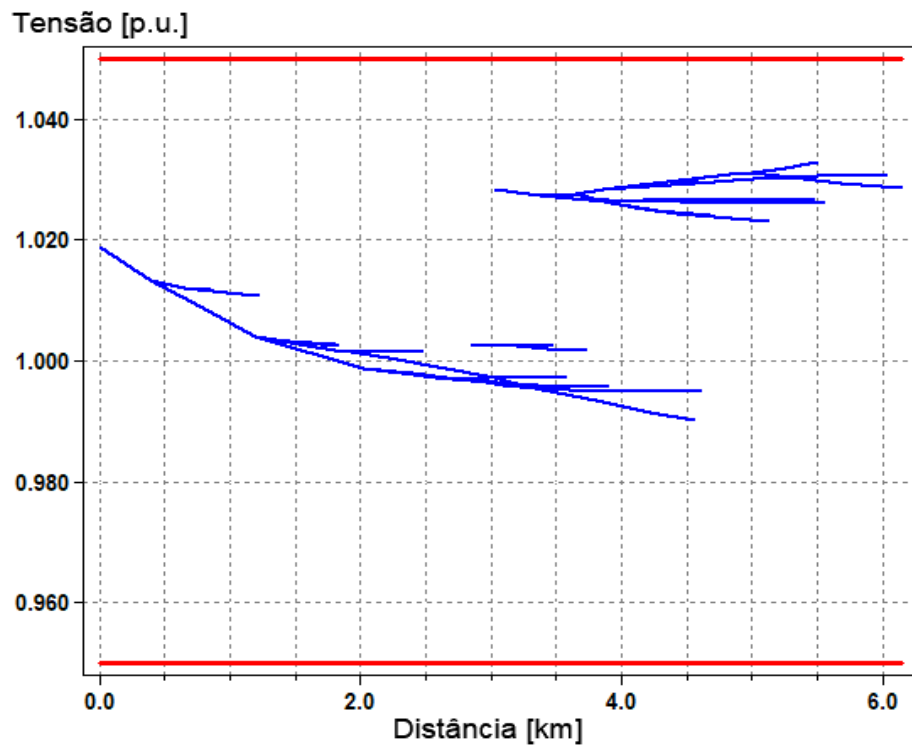
Fonte: Produzido pelo próprio autor.

Gráfico 10 – Perfil de tensão da fase S às 19 horas sem adição de veículos elétricos



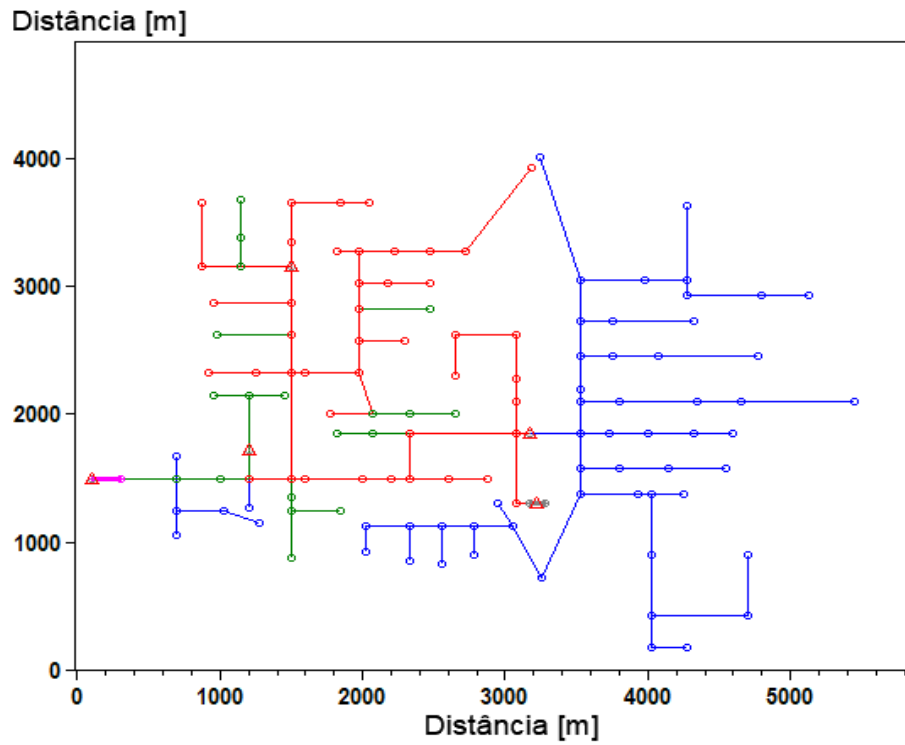
Fonte: Produzido pelo próprio autor.

Gráfico 11 – Perfil de tensão da fase T às 19 horas sem adição de veículos elétricos



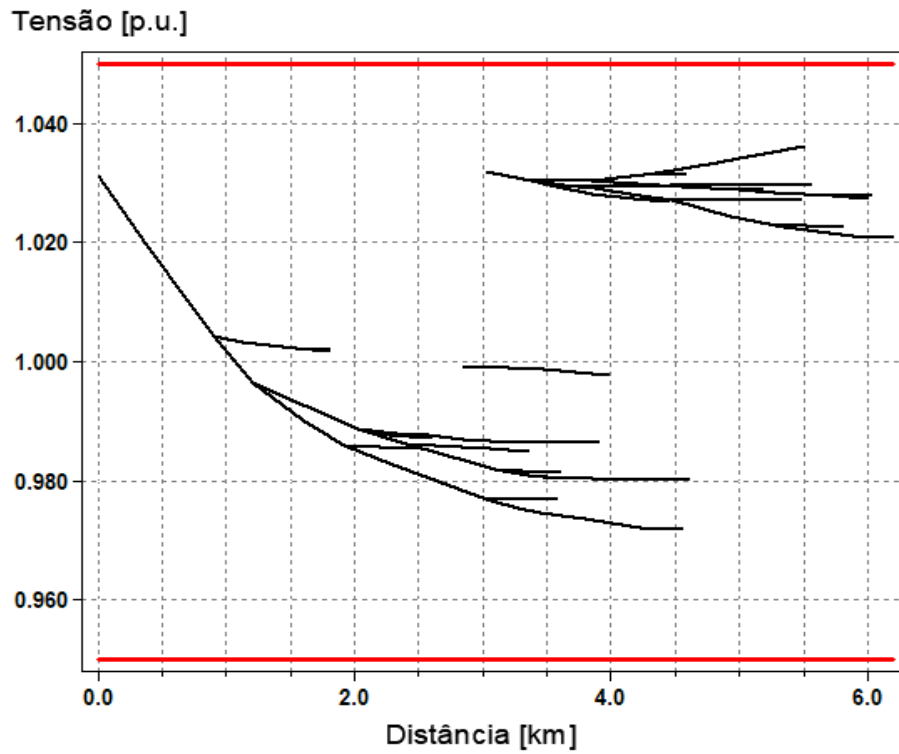
Fonte: Produzido pelo próprio autor.

Figura 7 – Tensão média nos barramentos do sistema às 19 horas com adição de veículos elétricos



Fonte: Produzido pelo próprio autor.

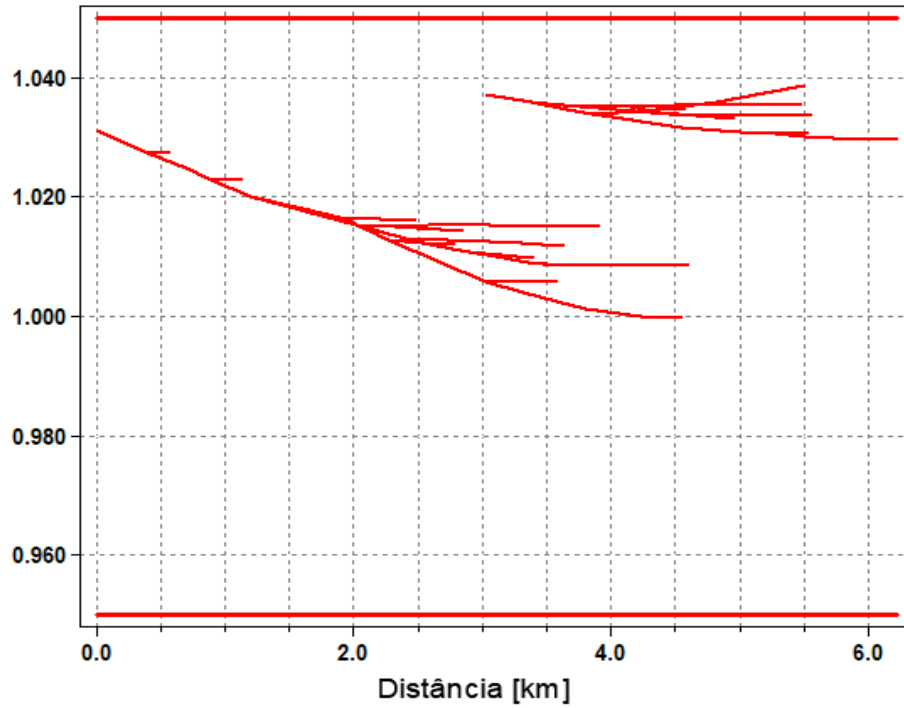
Gráfico 12 – Perfil de tensão da fase R às 19 horas com adição de veículos elétricos



Fonte: Produzido pelo próprio autor.

Gráfico 13 – Perfil de tensão da fase S às 19 horas com adição de veículos elétricos

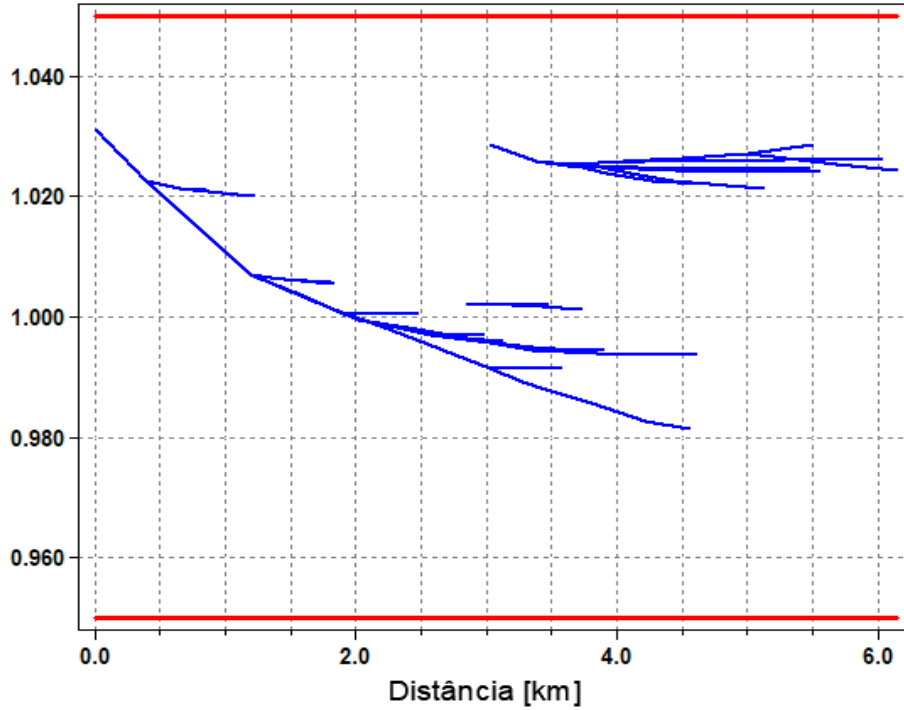
Tensão [p.u.]



Fonte: Produzido pelo próprio autor.

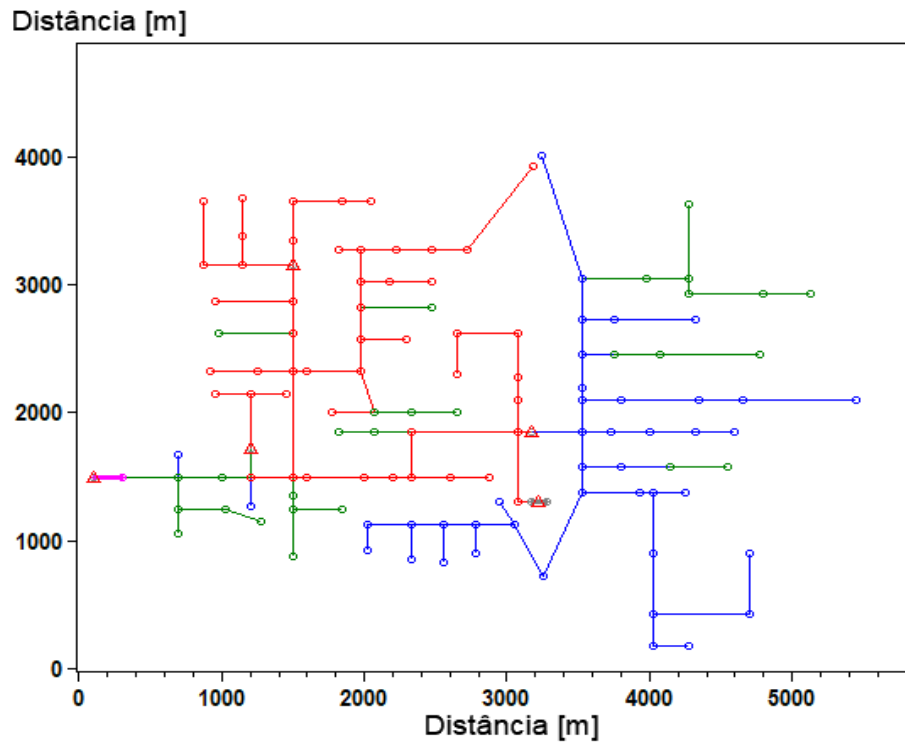
Gráfico 14 – Perfil de tensão da fase T às 19 horas com adição de veículos elétricos

Tensão [p.u.]



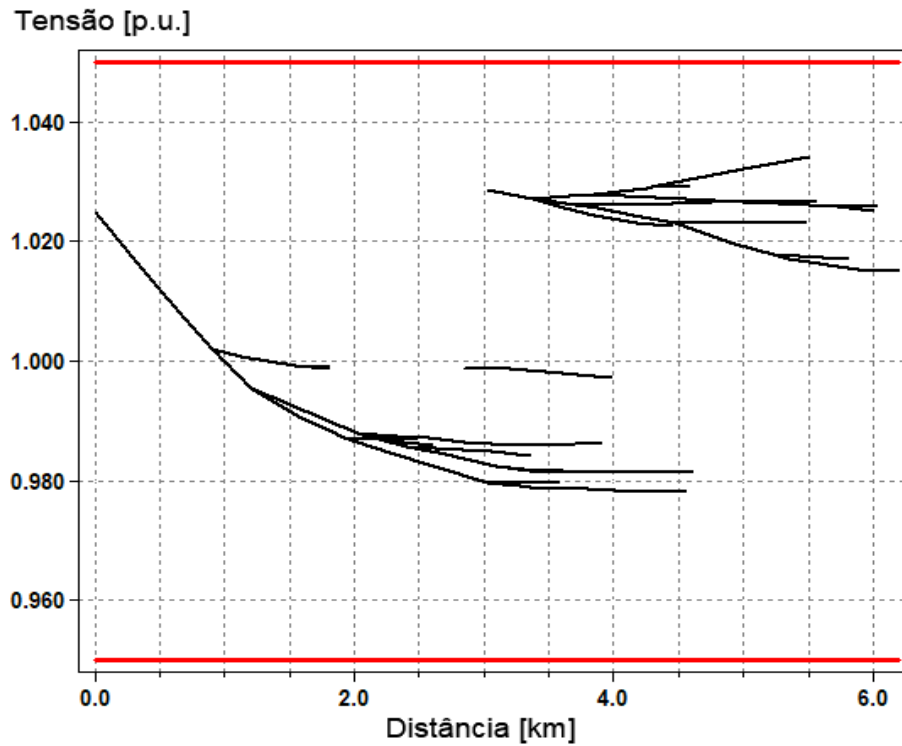
Fonte: Produzido pelo próprio autor.

Figura 8 – Tensão média nos barramentos do sistema às 21 horas sem adição de veículos elétricos



Fonte: Produzido pelo próprio autor.

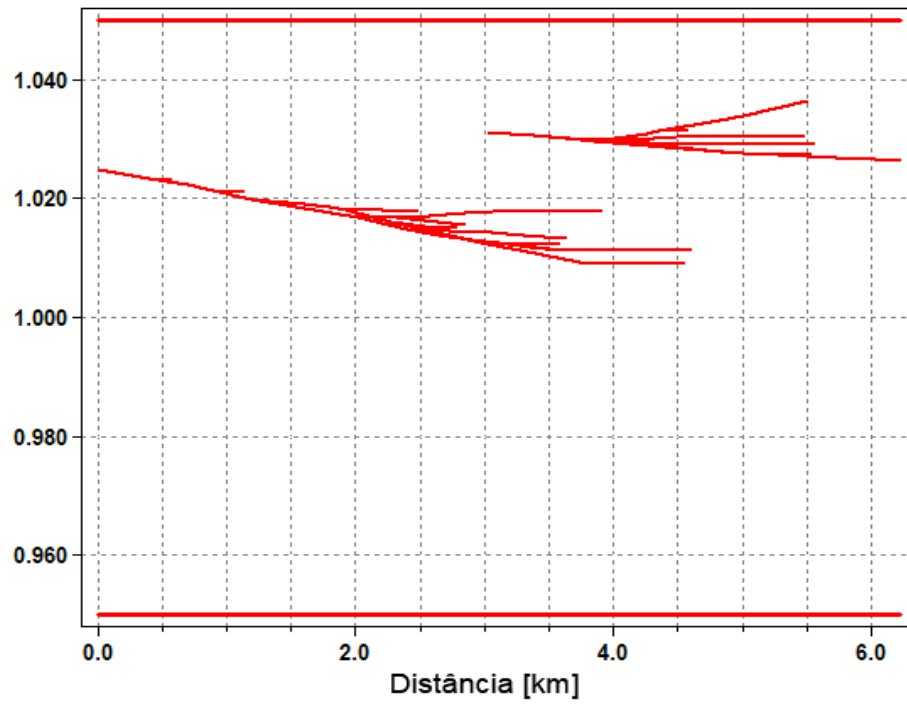
Gráfico 15 – Perfil de tensão da fase R às 21 horas sem adição de veículos elétricos



Fonte: Produzido pelo próprio autor.

Gráfico 16 – Perfil de tensão da fase S às 21 horas sem adição de veículos elétricos

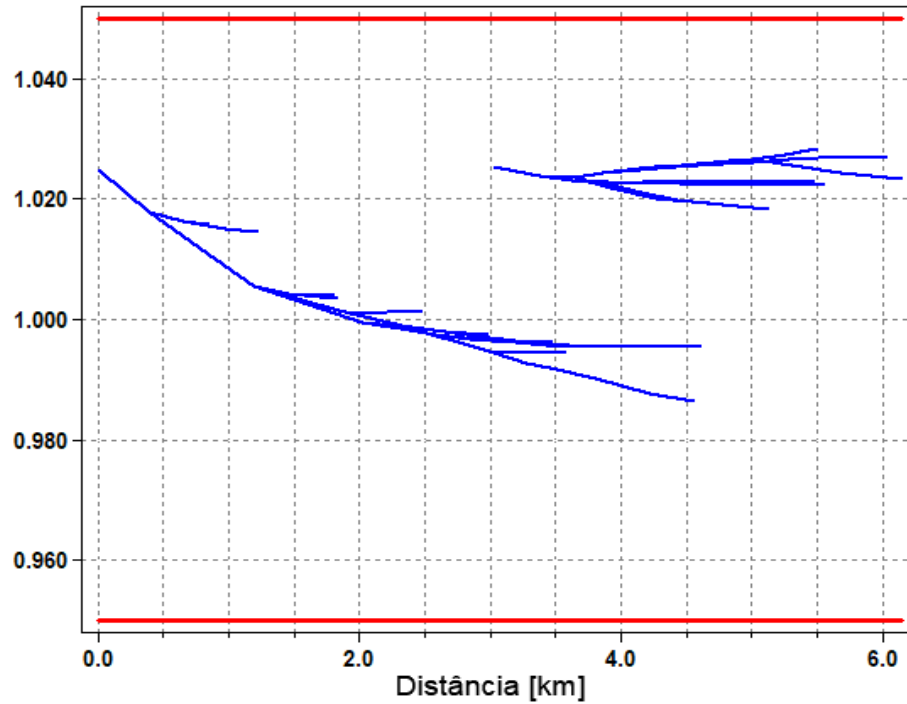
Tensão [p.u.]



Fonte: Produzido pelo próprio autor.

Gráfico 17 – Perfil de tensão da fase T às 21 horas sem adição de veículos elétricos

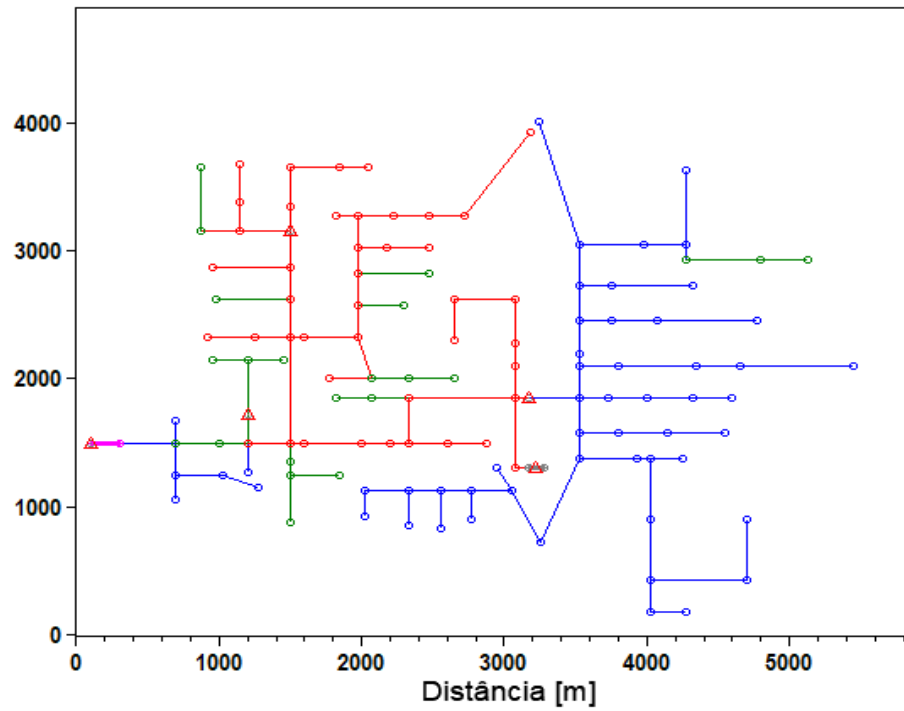
Tensão [p.u.]



Fonte: Produzido pelo próprio autor.

Figura 9 – Tensão média nos barramentos do sistema às 21 horas com adição de veículos elétricos

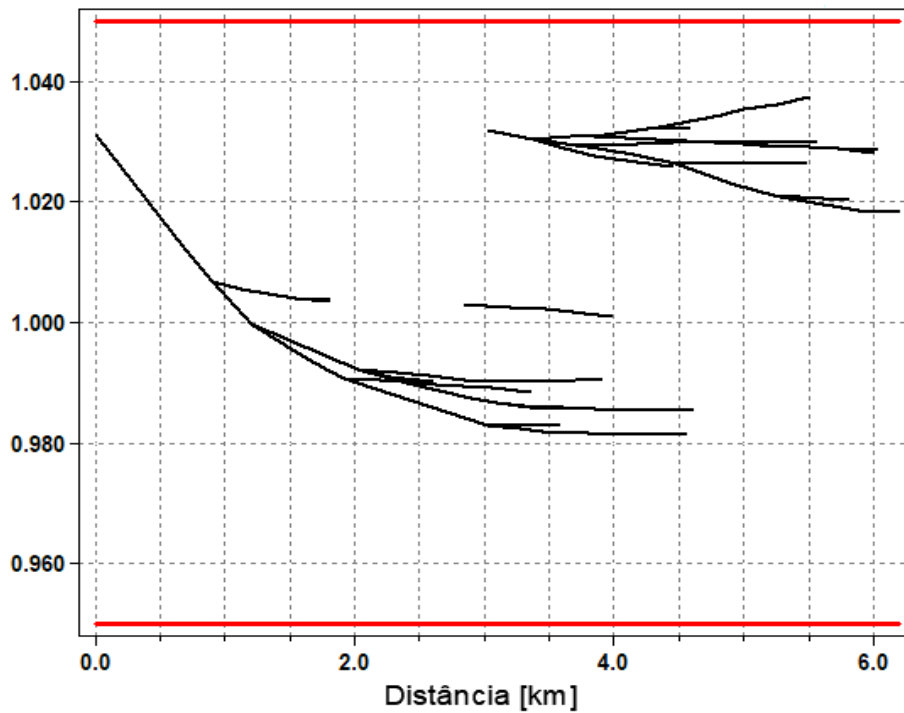
Distância [m]



Fonte: Produzido pelo próprio autor.

Gráfico 18 – Perfil de tensão da fase R às 21 horas com adição de veículos elétricos

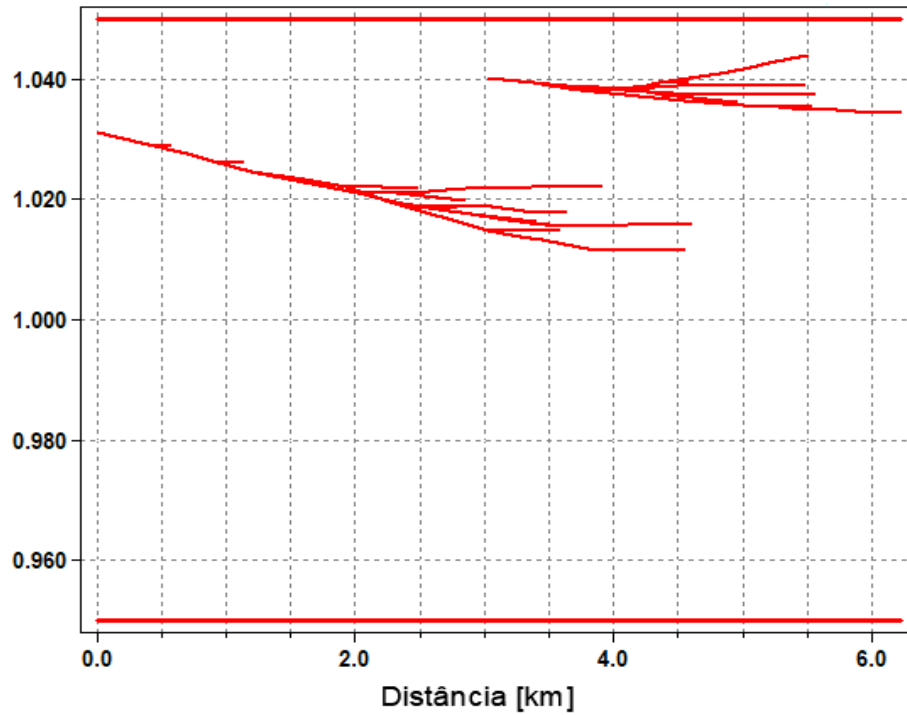
Tensão [p.u.]



Fonte: Produzido pelo próprio autor.

Gráfico 19 – Perfil de tensão da fase S às 21 horas com adição de veículos elétricos

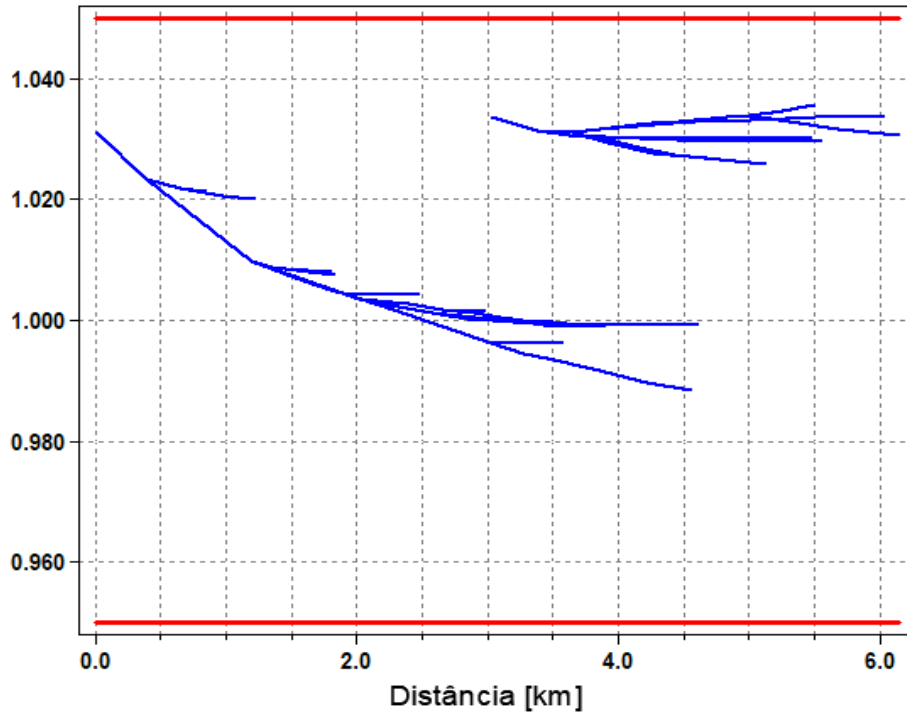
Tensão [p.u.]



Fonte: Produzido pelo próprio autor.

Gráfico 20 – Perfil de tensão da fase T às 21 horas com adição de veículos elétricos

Tensão [p.u.]



Fonte: Produzido pelo próprio autor.

Observando as figuras dos perfis de tensão percebe-se que a mudança de cenário tem um grande impacto no nível de tensão em várias partes do sistema, sendo mais acentuada nos diagramas das 19 horas com a presença de veículos elétricos. Assim, foram selecionados os barramentos 8, 28, 51, 6, 83 e o alimentador para analisar o desequilíbrio entre as fases gerado como consequência da adição desordenada de cargas. Optou-se por selecionar esses barramentos pois estes apresentaram uma das maiores diferenças nas suas tensões de fase, então, seria de total interesse verificar o fator de desequilíbrio nesses pontos do sistema.

Nos quadros a seguir são apresentadas as tensões nas três fases de cada barramento e suas componentes simétricas. O desequilíbrio de tensão é definido pela diferença nas amplitudes e na defasagem de 120° elétricos entre as fases. Assim, quanto maior for a grandeza fator de desequilíbrio de tensão, FD, pior é para o sistema. O valor de referência nos barramentos do sistema de distribuição com tensão nominal entre 1 kV e 230 kV deve ser igual ou inferior a 2% segundo o Módulo 8 do PRODIST (ANEEL, 2018b, p. 17) sobre qualidade da energia elétrica.

Quadro 7 – Tensão nos barramentos do sistema às 19 horas sem adição de veículos elétricos

	V_R	V_S	V_T
Alimentador	2,4018 $\angle 0^\circ$	2,4018 $\angle -120,0^\circ$	2,4018 $\angle 120,0^\circ$
Barramento 8	2,4044 $\angle -1,1^\circ$	2,4410 $\angle -120,6^\circ$	2,4199 $\angle 119,4^\circ$
Barramento 28	2,3740 $\angle -1,8^\circ$	2,4333 $\angle -120,9^\circ$	2,3931 $\angle 119,1^\circ$
Barramento 51	2,3629 $\angle -1,9^\circ$	2,4194 $\angle -121,1^\circ$	2,3895 $\angle 118,9^\circ$
Barramento 66	2,3634 $\angle -2,6^\circ$	2,4211 $\angle -121,5^\circ$	2,3785 $\angle 118,3^\circ$
Barramento 83	2,4873 $\angle -3,1^\circ$	2,4891 $\angle -122,1^\circ$	2,4808 $\angle 117,8^\circ$

Fonte: Produzido pelo próprio autor.

Quadro 8 – Componentes simétricas dos barramentos do sistema às 19 horas sem adição de veículos elétricos

	V_0	V_1	V_2
Alimentador	0 $\angle 0^\circ$	2,4018 $\angle 0^\circ$	0 $\angle 0^\circ$
Barramento 8	0,0157 $\angle -124,3^\circ$	2,4217 $\angle -0,8^\circ$	0,0088 $\angle -174,7^\circ$
Barramento 28	0,0274 $\angle -119,6^\circ$	2,4001 $\angle -1,2^\circ$	0,0132 $\angle -177,3^\circ$
Barramento 51	0,0241 $\angle -126,5^\circ$	2,3905 $\angle -1,4^\circ$	0,0141 $\angle -171,5^\circ$
Barramento 66	0.0279 $\angle -112,3^\circ$	2,3876 $\angle -1,9^\circ$	0.0147 $\angle -175,9^\circ$
Barramento 83	0.0163 $\angle -85,4^\circ$	2,4857 $\angle -2,5^\circ$	0.0114 $\angle -95,1^\circ$

Fonte: Produzido pelo próprio autor.

Quadro 9 – Tensão nos barramentos do sistema às 19 horas com adição de veículos elétricos

	V_R	V_S	V_T
Alimentador	2,4018 $\angle 0^\circ$	2,4018 $\angle -120,0^\circ$	2,4018 $\angle 120,0^\circ$
Barramento 8	2,4122 $\angle -1,8^\circ$	2,4569 $\angle -121,2^\circ$	2,4326 $\angle 118,7^\circ$
Barramento 28	2,3696 $\angle -3,1^\circ$	2,4386 $\angle -122,1^\circ$	2,3914 $\angle 117,8^\circ$
Barramento 51	2,3542 $\angle -3,2^\circ$	2,4220 $\angle -122,4^\circ$	2,3869 $\angle 117,5^\circ$
Barramento 66	2,3341 $\angle -4,7^\circ$	2,4012 $\angle -123,4^\circ$	2,3570 $\angle 116,3^\circ$
Barramento 83	2,4888 $\angle -5,6^\circ$	2,4947 $\angle -124,4^\circ$	2,4704 $\angle 115,5^\circ$

Fonte: Produzido pelo próprio autor.

Quadro 10 – Componentes simétricas dos barramentos do sistema às 19 horas com adição de veículos elétricos

	V_0	V_1	V_2
Alimentador	0 $\angle 0^\circ$	2,4018 $\angle 0^\circ$	0 $\angle 0^\circ$
Barramento 8	0,0176 $\angle -124,6^\circ$	2,4338 $\angle -1,4^\circ$	0,0121 $\angle -178,1^\circ$
Barramento 28	0,0302 $\angle -0.0^\circ$	2,3998 $\angle -2.5^\circ$	0,0165 $\angle 176,0^\circ$
Barramento 51	0,0257 $\angle -129,8^\circ$	2,3877 $\angle -2,7^\circ$	0,0180 $\angle 178,0^\circ$
Barramento 66	0.0307 $\angle -115.7^\circ$	2,3640 $\angle -3.9^\circ$	0.0190 $\angle -174.8^\circ$
Barramento 83	0.0239 $\angle -86.8^\circ$	2,4845 $\angle -4.8^\circ$	0.0097 $\angle -90.5^\circ$

Fonte: Produzido pelo próprio autor.

Quadro 11 – Tensão nos barramentos do sistema às 21 horas sem adição de veículos elétricos

	V_R	V_S	V_T
Alimentador	2,4018 $\angle 0^\circ$	2,4018 $\angle -120,0^\circ$	2,4018 $\angle 120,0^\circ$
Barramento 8	2,4066 $\angle -1,3^\circ$	2,4532 $\angle -120,6^\circ$	2,4261 $\angle 119,3^\circ$
Barramento 28	2,3686 $\angle -2,2^\circ$	2,4444 $\angle -121,0^\circ$	2,3931 $\angle 119,0^\circ$
Barramento 51	2,3569 $\angle -2,2^\circ$	2,4289 $\angle -121,3^\circ$	2,3905 $\angle 118,8^\circ$
Barramento 66	2,3499 $\angle -3,2^\circ$	2,4238 $\angle -121,7^\circ$	2,3693 $\angle 118,0^\circ$
Barramento 83	2,4839 $\angle -3,7^\circ$	2,4890 $\angle -122,4^\circ$	2,4698 $\angle 117,4^\circ$

Fonte: Produzido pelo próprio autor.

Quadro 12 – Componentes simétricas dos barramentos do sistema às 21 horas sem adição de veículos elétricos

	V_0	V_1	V_2
Alimentador	0 $\angle 0^\circ$	2,4018 $\angle 0^\circ$	0 $\angle 0^\circ$
Barramento 8	0,0196 $\angle -120,8^\circ$	2,4286 $\angle -0,9^\circ$	0,0124 $\angle -174,7^\circ$
Barramento 28	0,0356 $\angle -119,3^\circ$	2,4019 $\angle -1,4^\circ$	0,0170 $\angle -175,2^\circ$
Barramento 51	0,0306 $\angle -129,4^\circ$	2,3920 $\angle -1,6^\circ$	0,0166 $\angle -174,6^\circ$
Barramento 66	0,0363 $\angle -111,4^\circ$	2,3808 $\angle -2,3^\circ$	0,0196 $\angle -173,8^\circ$
Barramento 83	0,0232 $\angle -83,0^\circ$	2,4808 $\angle -2,9^\circ$	0,0119 $\angle -98,2^\circ$

Fonte: Produzido pelo próprio autor.

Quadro 13 – Tensão nos barramentos do sistema às 21 horas com adição de veículos elétricos

	V_R	V_S	V_T
Alimentador	2,4018 $\angle 0^\circ$	2,4018 $\angle -120,0^\circ$	2,4018 $\angle 120,0^\circ$
Barramento 8	2,4181 $\angle -1,4^\circ$	2,4653 $\angle -120,8^\circ$	2,4373 $\angle 119,2^\circ$
Barramento 28	2,3783 $\angle -2,4^\circ$	2,4545 $\angle -121,3^\circ$	2,4017 $\angle 118,7^\circ$
Barramento 51	2,3670 $\angle -2,4^\circ$	2,4396 $\angle -121,5^\circ$	2,4000 $\angle 118,6^\circ$
Barramento 66	2,3576 $\angle -3,5^\circ$	2,4300 $\angle -122,1^\circ$	2,3738 $\angle 117,6^\circ$
Barramento 83	2,4914 $\angle -4,2^\circ$	2,5075 $\angle -122,9^\circ$	2,4873 $\angle 117,0^\circ$

Fonte: Produzido pelo próprio autor.

Quadro 14 – Componentes simétricas dos barramentos do sistema às 21 horas com adição de veículos elétricos

	V_0	V_1	V_2
Alimentador	0 $\angle 0^\circ$	2,4018 $\angle 0^\circ$	0 $\angle 0^\circ$
Barramento 8	0,0199 $\angle -124,7^\circ$	2,4402 $\angle -1,0^\circ$	0,0111 $\angle -179,0^\circ$
Barramento 28	0,0348 $\angle -120,1^\circ$	2,4114 $\angle -1,7^\circ$	0,0167 $\angle -178,6^\circ$
Barramento 51	0,0310 $\angle -129,1^\circ$	2,4021 $\angle -1,8^\circ$	0,0166 $\angle -175,8^\circ$
Barramento 66	0,0342 $\angle -113,1^\circ$	2,3887 $\angle -2,7^\circ$	0,0196 $\angle -175,2^\circ$
Barramento 83	0,0240 $\angle -95,2^\circ$	2,4953 $\angle -3,4^\circ$	0,0128 $\angle -108,7^\circ$

Fonte: Produzido pelo próprio autor.

Para o cálculo do fator de desequilíbrio entre as fases, é necessário apenas o módulo das componentes simétricas positiva e negativa das tensões. Segundo o Módulo 8 do PRODIST (ANEEL, 2018b, p. 17), o valor de FD é a razão entre o módulo da tensão de sequência negativa e o módulo da tensão de sequência positiva. Como dito anteriormente, o valor de referência para o sistema de estudo não pode exceder o valor de 2%. Então, é apresentado o valor do fator de desequilíbrio entre as fases em cada um dos barramentos em cada cenário diferente pelo Quadro 15.

Quadro 15 – Fator de desequilíbrio nos barramentos nos horários de ponta

	19h	19h com VE	21h	21h com VE
Alimentador	0,000	0,000	0,000	0,000
Barramento 8	0,3617	0,4988	0,5091	0,4556
Barramento 28	0,5496	0,6862	0,7063	0,6945
Barramento 51	0,5909	0,7551	0,6943	0,6898
Barramento 66	0,6175	0,8024	0,8224	0,8191
Barramento 83	0,4573	0,3889	0,4781	0,5116

Fonte: Produzido pelo próprio autor.

Ao analisar os resultados obtidos pelo programa e suas relações, pode-se concluir que os resultados são satisfatórios e adequados. Apesar de que nos gráficos de perfil de tensão aparentemente a tendência da curva pode indicar que houve uma queda muito grande nos cenários escolhidos para estudo, pode-se concluir que além dos valores das tensões estarem

dentro dos valores recomendados para distribuição, as três tensões seguem a mesma tendência em suas curvas no perfil de tensão.

Para concluir que mesmo que a queda em cada fase não seja exatamente a mesma devido ao desequilíbrio natural do circuito, foi calculado o fator de desequilíbrio do sistema nos pontos em que foram percebidas as maiores diferenças nas tensões. Assim, após calcular o fator de desequilíbrio, foi feita comparação com os resultados obtidos com os valores de referência da norma e se conclui que mesmo com essa diferença nos níveis de tensão entre fases nos locais selecionados, esse desequilíbrio do sistema ainda assim é aceitável e não causa grandes problemas aos componentes do sistema.

7 CONCLUSÃO

As motivações para a substituição dos veículos a combustão por veículos elétricos crescem a cada dia, e fatores como econômicos e ambientais estão exercendo um peso cada vez maior com o passar do tempo. O desenvolvimento sustentável exige cada vez mais que a produção, transporte e utilização de energia se torne mais eficiente, uma vez que o cenário atual está muito dependente de fontes de energia não renováveis. As pesquisas e tecnologias relacionadas aos veículos elétricos apresentam que cada vez mais esses veículos são um dos primeiros passos que pode ser dado para chegar mais próximo de um futuro sem a dependência de combustíveis fósseis.

Apesar da poluição gerada por veículos elétricos estar diretamente relacionada à matriz energética do país. O grande diferencial que a troca de frota proporciona é a mudança no método de poluição gerada. Os veículos elétricos, apesar de não ser tão perceptível, poluem o que a fonte geradora do país polui. No caso do Brasil em que mais e 67% da geração de energia são de hidroelétricas, a energia produzida gera menos impactos para o ambiente. Porém, a poluição gerada por veículos elétricos se encontra concentrada nas usinas geradoras, o que facilita no tratamento e inspeção das fontes poluidoras, enquanto os veículos a combustão geram poluição difusa, no local onde o veículo circula, trazendo a poluição mais próximo da população e dificultando o tratamento e inspeção das fontes poluidoras.

A substituição de uma frota de veículos por outra está sendo gradativa. Isso ajuda a população a se adequar às mudanças de hábitos que essa nova realidade vai exigir. Dentre todas as mudanças, a mais impactante e que não agrada tanto os consumidores é o recarregamento dos veículos elétricos. Apesar de existirem postos de recarga e troca de baterias descarregadas por meio de aluguel de baterias (método BSS), esses dois modelos podem não agradar os consumidores ou pelo tempo necessário para recarga ou pelo preço do serviço. Entretanto, com a possibilidade de recarga residencial, esse problema é resolvido. Porém, um outro é criado: sobrecarga no sistema de energia elétrica.

O aumento da carga instalada o sistema pode ser contornado com o aumento da produção de energia. Assim, as novas cargas seriam alimentadas sem mais complicações. Entretanto, o uso desordenado das cargas é o maior problema pois as cargas solicitarão do sistema uma grande

quantidade de energia em certos horários enquanto o resto do período os níveis exigidos do sistema são consideravelmente menores. Essa atitude gera menor eficiência, má utilização do sistema e maiores perdas em horários específicos.

Durante o projeto são apresentados dois cenários hipotéticos baseados em situações reais. O sistema *IEEE 123 test feeder* apresenta um cenário bem montado de um sistema de distribuição genérico. A partir deste, foram sendo adicionados veículos elétricos ao sistema baseado na expectativa de crescimento destes no Brasil para avaliar as mudanças que serão requeridas do sistema. Após a revisão de todos os resultados obtidos pelo projeto, pode-se perceber que a adição descontrolada de veículos elétricos gera grandes impactos num sistema de distribuição principalmente em horário de ponta. Dentre os apresentados, o mais preocupante é o aumento da potência que o sistema requer da rede nos horários de maior utilização.

Ao analisar pela ótica de que os cenários montados não foram baseados em sistemas reais por limitação de informações disponíveis. Percebe-se que com os dados utilizados com as suposições apresentadas, foi capaz de apresentar um sistema que se comporte como um sistema real sem mais complicações. O sistema genérico gerado pelo *IEEE 123 test feeder* suportou as mudanças impostas pelo segundo cenário. A maior preocupação seria se o aumento desordenado de cargas não fosse suportado pelo sistema, afetando a qualidade da energia fornecida aos consumidores. Entretanto, a tensão entregue aos consumidores nos pontos mais distantes está dentro dos parâmetros definidos como adequados. Isso indica que os condutores não precisam ser substituídos e as quedas de tensão e perdas são aceitáveis. A previsão do acréscimo de veículos elétricos para o ano de 2025 não produz tantos efeitos negativos no sistema em estudo, porém foram apresentadas algumas características que devem ser tratadas caso as previsões do crescimento da frota realmente aconteçam, ou pior, sejam superadas.

O fator de potência do sistema deve ser ajustado em alguns horários, os transformadores precisam ser substituídos ao analisar numa perspectiva econômica. Por fim, a curva de carga do sistema pode receber algumas modificações citadas anteriormente para diminuir a sobrecarga do sistema em horários de ponta e assim fazer um melhor uso do sistema em horários de baixa demanda.

Apesar do novo sistema precisar de pequenos ajustes para estar dentro dos padrões a ANEEL, deve-se pensar na possível expansão do sistema para situações adversas. Enquanto a realidade aqui estudada é de apenas 4,4% da frota de veículos a combustão sendo substituídos por veículos elétricos até 2025, os incentivos para o uso de veículos elétricos crescem a cada dia com os avanços tecnológicos e a necessidade da redução da emissão de gases poluentes. Em contraste com o cenário estudado, muitos países da Europa planejam fazer a troca completa da sua frota de veículos a combustão, se fazendo necessário que o sistema elétrico esteja preparado para suportar tais mudanças. Sendo assim, as propostas indicadas para tratamento da demanda em horário de ponta não se tornam apenas uma possível solução, mas são métodos necessários para comportar toda essa nova carga que será adicionada. Adicionalmente, os métodos expostos para a solução da situação encontrada são apenas alguns dentre muitos. Vale ressaltar que cada vez mais novos métodos são encontrados e testados, novas tecnologias estão sendo colocadas em prática e, com isso, todo o cenário apresentado hoje como o ideal para a solução dos problemas pode ser ultrapassado em menos de décadas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST**, Módulo 2 – Planejamento da Expansão do Sistema de Distribuição. 2016. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/modulo-2>. Acesso em: 10 nov. 2019.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST**, Módulo 3 – Acesso ao Sistema de Distribuição. 2017. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/modulo-3>. Acesso em: 10 nov. 2019.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST**, Módulo 7 – Cálculo de Perdas na Distribuição. 2018a. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/modulo-7>. Acesso em: 10 nov. 2019.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST**, Módulo 8 – Qualidade de Energia Elétrica. 2018b. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/modulo-8>. Acesso em: 10 nov. 2019.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **Transmissão e distribuição de energia elétrica**, Módulo 4 – Transmissão, distribuição e comercialização de energia elétrica. 2017. Disponível em: http://www.labtime.ufg.br/modulos/aneel/mod4_uni1_sl16.html. Acesso em: 10 nov. 2019.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **Montante de Uso do Sistema de Distribuição - MUSD**. 2015. Disponível em: https://www.aneel.gov.br/home?p_p_id=101&p_p_lifecycle=0&p_p_state=maximized&p_p_mode=view&_101_struts_action=%2Fasset_publisher%2Fview_content&_101_returnToFullPageURL=%2F&_101_assetEntryId=15051143&_101_type=content&_101_groupId=656835&_101_urlTitle=montante-de-uso-do-sistema-de-distribuicao-musd&inheritRedirect=true. Acesso em: 15 nov. 2019.
- AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS – ANP. **Gasolina**. 2018. Disponível em: <http://www.anp.gov.br/wwwanp/petroleo-derivado/155-combustiveis/1855-gasolina>. Acesso em: 30 out. 2019.
- AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS – ANP. **Anuário estatístico brasileiro do petróleo, gás natural e biocombustíveis**: 2019. Rio de Janeiro: ANP, 2008-2019. ISSN 1983-5884.
- ARAUJO, Alexandre Lenerneier de; EICHENBERGER, Alyne Carolina. **Inserção de veículos elétricos**: análise dos impactos no sistema elétrico de potência na subestação Central/Batel em Curitiba. 2015. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Industrial Elétrica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5356** – Transformador de potência. Rio de Janeiro: ABNT, 1993.

BARASSA, Edgar. **Trajectoria tecnológica do veículo elétrico: atores, políticas e esforços tecnológicos no Brasil**. 2015. Dissertação (Mestrado em Política Científica e Tecnológica) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2015.

BASSO, Cleofe. **O impacto dos veículos elétricos plug-in no sistema elétrico de potência**. 2011. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) – Fundação Universidade Federal do Pampa, Alegrete, 2011.

CARDOSO, Bruno Pereira. **Eficiência de transformadores de média tensão**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2005.

CORRÊA, Rodrigo de Mesquita. **Avaliação do impacto da conexão de veículos elétricos em sistemas de potência**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2018.

DETRAN-ES – DEPARTAMENTO ESTADUAL DE TRÂNSITO. **Frota 2018**. 2018. Disponível em: <http://https://detran.es.gov.br/frota>. Acesso em: 27 set. 2019.

EDP. **Tarifas** – clientes atendidos em baixa tensão (grupo B). 2017. Disponível em: <https://www.edpsu.pt/pt/tarifasehorarios/horarios/Pages/HorariosBTN.aspx>. Acesso em: 30 out. 2019.

HAFNER, Angelo. **Motores monofásicos e de propósito especial**. 2013. Disponível em: <https://pt.slideshare.net/angeloahafner/single-phase-and-special-propose-motors-25386656>. Acesso em: 10 nov. 2019.

IEEE – INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **Radial distribution test feeders: Distribution system analysis subcommittee report**. 1992. Disponível em: <http://site.ieee.org/pes-testfeeders/files/2017/08/testfeeders.pdf>. Acesso em: 30 out. 2019.

MARQUES, Horst Huldreish Ardila Hamada. **Utilização de um veículo elétrico para abastecer uma residência no horário de ponta**. 2015. Trabalho de conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia elétrica) e Dissertação (Mestrado em Engenharia Eletroeletrônica) – Universidade Presbiteriana Mackenzie e Instituto Superior de Engenharia do Porto, São Paulo, 2015.

RICARDO, Marco Filipe da Costa. **Contributo dos sistemas de informação geográfica para a mobilidade elétrica: localização de áreas ótimas para *park&ride*, baseadas na rede de metro do porto**. 2012. Dissertação (Mestrado em Gestão do Território) – Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2012.

ROCHA, Bruno de Paula. **Estudos elétricos para avaliação do impacto da geração distribuída na rede de distribuição e na formação de microrredes**. 2010. Trabalho de

Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) – Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

SALDANHA, John Jefferson Antunes. **Gerenciamento inteligente da recarga de veículos elétricos otimizando a operação do sistema elétrico de potência**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Pampa, Alegrete, 2017.

SANTOS, Ana Carolina Fabricio da Rocha. **Análise da viabilidade técnica e econômica de um veículo elétrico versus veículo a combustão**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Especialização em Eficiência Energética Aplicada aos Processos Produtivos) – Universidade Federal de Santa Maria, Santana do Livramento, 2017.

SANTOS, Gustavo Antônio Galvão dos; SANTOS, Bruno Galvão dos; MEDEIROS, Rodrigo Loureiro; D'ARAÚJO, Roberto Pereira. Carro elétrico, a revolução geopolítica e econômica do século XXI e o desenvolvimento do Brasil. **OIKOS**, Rio de Janeiro, v. 8, n. 2, p. 329-353, 2009.

SANTOS, João. **Tipos de Motores**. 2018 Disponível em: <https://novaescola.org.br/plano-de-aula/2801/tipos-de-motores#atividade>. Acesso em: 10 nov. 2019.

SILVA, Adrielson de Oliveira. **Motores a combustão interna: Impactos ao meio ambiente e melhorias desenvolvidas**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) – Faculdade Pitágoras de Uberlândia, Uberlândia, 2018.

SILVA, João Paulo Niggli. **Avaliação de impactos da inserção dos veículos elétricos nos sistemas de distribuição das concessionárias EDP Bandeirante e EDP ESCELSA**. 2014. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

SILVA, Maria Luiza da Cruz Ferreira; FIGUEIREDO, Fernando Monteiro. Estudo da utilização ótima de transformadores de distribuição incorporando técnicas de tratamento de incertezas. *In: SEMINÁRIO NACIONAL DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA*, 16, 2004, Brasília. **Anais** [...]. Brasília, 2004. p. 790-805.

UOL. **Caros, veículos elétricos só devem chegar a 10% dos brasileiros**. Silva, Cleide. 2019. Disponível em: <https://economia.uol.com.br/noticias/estadao-conteudo/2019/11/16/preco-ainda-limita-venda-de-carros-eletricos.htm>. Acesso em: 20 nov. 2019.