

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CAMPUS CACHOEIRA DO SUL
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

Leonardo Taborda dos Santos

**O USO DE MODALIDADES TARIFÁRIAS PARA REDUÇÃO
DO IMPACTO CAUSADO PELO CARREGAMENTO DE
VEÍCULOS ELÉTRICOS AO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO**

**Cachoeira do Sul, RS, Brasil
2019**

Leonardo Taborda dos Santos

**O USO DE MODALIDADES TARIFÁRIAS PARA REDUÇÃO DO
IMPACTO CAUSADO PELO CARREGAMENTO DE VEÍCULOS
ELÉTRICOS AO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso Apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) - Campus Cachoeira do Sul, como requisito parcial para obtenção do grau de **Bacharel em Engenharia Elétrica**.

Orientador: Dr. Fernando Guilherme Kaehler Guarda

Cachoeira do Sul, RS, Brasil
2019

Ficha catalográfica elaborada através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Central da UFSM, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Santos, Leonardo Taborda dos

O Uso de Modalidades Tarifárias para Redução do Impacto Causado pelo Carregamento de Veículos Elétricos ao Sistema de Distribuição / Leonardo Taborda dos Santos - 2019

73 p.; 30 cm

Orientador: Fernando Guilherme Kaehler Guarda

TCC (graduado) – Universidade Federal de Santa Maria - Campus Cachoeira do Sul, Curso de Engenharia Elétrica, RS, 2019

1. Engenharia Elétrica 2. Veículos Elétricos 3. Sistemas de Carregamento 4. Impactos na Distribuição I. Guarda, Fernando Guilherme II. Título.

© 2019

Todos os direitos autorais reservados a Leonardo Taborda dos Santos. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita com autorização por escrito do autor.

Endereço: Rua Major Ouriques, 1552/02, Bairro Centro, Cachoeira do Sul, RS, Brasil, 96508-014;

Fone: (55) 99611-2884;

Endereço Eletrônico: leonardo.tds@outlook.com

Leonardo Taborda dos Santos

**O USO DE MODALIDADES TARIFÁRIAS PARA REDUÇÃO DO
IMPACTO CAUSADO PELO CARREGAMENTO DE VEÍCULOS
ELÉTRICOS AO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso Apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) - Campus Cachoeira do Sul, como requisito parcial para obtenção do grau de **Bacharel em Engenharia Elétrica.**

Aprovado em 12 de Dezembro de 2019:

Fernando Guilherme Kaehler Guarda, Dr. (UFSM)
(Presidente/ Orientador)

Prof. Dion Lenon Prediger Feil, Dr. (UFSM)

Prof. Laura Lisiane Callai dos Santos, Dr. (UFSM)

Cachoeira do Sul, RS, Brasil
2019

“The man who lies asleep will
never waken fame, and his desire
and all his life drift past him like
a dream, and the traces of his
memory fade from time like
smoke in air, or ripples on a
stream.

**Dante Alighieri,
The Divine Comedy”**

RESUMO

O USO DE MODALIDADES TARIFÁRIAS PARA REDUÇÃO DO IMPACTO CAUSADO PELO CARREGAMENTO DE VEÍCULOS ELÉTRICOS AO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO

AUTOR: LEONARDO TABORDA DOS SANTOS
ORIENTADOR: FERNANDO GUILHERME KAEHLER GUARDA

A crescente necessidade por meios de transporte mais eficientes e a gestão de recursos ambientais representa um importante fator no desenvolvimento tecnológico de diversas áreas. Tal necessidade coloca os Veículos Elétricos (VEs) como uma solução atrativa para o suprimento da demanda por meios de transporte e preservação ambiental no meio urbano. Por conta disso, seja por motivos políticos, ou pela necessidade de tornar grandes centros urbanos menos agressivos ao meio ambiente, muitos países já começaram a realizar incentivos fiscais para promover essa mudança. Nesse contexto, caso haja uma quantidade significativa de veículos elétricos solicitando recarga ao mesmo tempo, a operação do sistema elétrico de potência (SEP) será comprometida. Para observar se o sistema atual está apto a continuar funcionando de forma adequada, será feita uma análise referente ao aumento de carga ocasionado pela penetração de VEs no sistema de distribuição. Tal abordagem será feita a partir de um aspecto econômico, avaliando a viabilidade do uso de métodos coordenados de carregamento aliados ao uso de uma modalidade tarifária distinta da tarifa convencional, conhecida como tarifa branca. Para garantir a aplicabilidade dos dados obtidos durante o trabalho, a análise será feita a partir da modelagem de curvas de carga de diferentes unidades consumidoras aptas à mudança de tarifa, em diferentes cenários de carregamento, variando o horário e número de veículos inseridos à rede. Por fim, essa análise tem como objetivo identificar possíveis soluções ao aumento de carga ocasionado pelo uso de VEs, para que seja possível evitar problemas causados pela penetração desses veículos no sistema de distribuição de energia elétrica. Os resultados mostram que o uso da tarifa branca junto ao carregamento coordenado são viáveis na redução do aumento de carga, mas não garantem um desconto ao consumidor, impossibilitando o seu uso para os consumidores analisados. Todavia, tais resultados são promissores e devem ser considerados para diferentes unidades consumidoras.

Palavras-chave: Veículos Elétricos; Sistema de Distribuição; Estratégias de Carregamento; Tarifa Branca.

ABSTRACT

THE USE OF TARIFF MODES IN ORDER TO REDUCE THE IMPACT CAUSED BY THE CHARGING OF ELECTRIC VEHICLES IN THE DISTRIBUTION SYSTEM

AUTHOR: LEONARDO TABORDA DOS SANTOS
ADVISOR: FERNANDO GUILHERME KAEHLER GUARDA

The growing need for more efficient ways of transport and the manage of natural resources represents an important factor in the technological development of many areas of expertise. This necessity puts Electric Vehicles (EVs) as an attractive solution to supply the demand for transport and environmental preservation of urban areas. With that in mind, be it for political matters or for the need of turning large urban centers less aggressive to the environment, lots of countries already started doing tax cuts as a way to promote this change. In this context, if there is a significant number of EVs seeking for a recharge at the same time, the operation of the electric power system might become compromised. In order to observe if the current system is able to keep working properly, it will be made an analysis related to the load increase caused by the penetration of EVs in the distribution system. Such approach will take in account the economic aspect, evaluating the viability of the use of coordenated charging methods allied to the use of different tariff modes, such as the "Tarifa Branca", which its known for varying its price throughout the day. In order to validate the data obtained during the development of this paper, a change of tariff alongside different cenarios of charging, with variable times of penetration and number o vehicles connected to the grid, will be implemented. Lastly, this analysis objective is to identify possible solutions to the load increase in order to avoid problems to the distribution system that are related to the recharge of EVs. The results show that the use of the "Tarifa Branca"as well as the coordenated charging is viable to reduce the load peak, however they do not provide a discount to the costumer, making this strategy not viable. Nevertheless, these results are promissing and must be considered for different cases.

Keywords: Electric Vehicles; Distribution System; Charging Methods; Tarifa Branca

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Veículo elétrico usado como táxi em Nova Iorque em 1901	17
Figura 2.2 – Componentes principais de um Veículo Elétrico.....	20
Figura 2.3 – Classificação de carregadores para Veículos Elétricos.	21
Figura 2.4 – Perfil de recarga de uma bateria de lítio-ferro.	22
Figura 2.5 – Curva de carga residencial	25
Figura 2.6 – Comparativo entre a Tarifa Branca e a Tarifa Convencional	27
Figura 2.7 – Exemplo de carregamento descoordenado	29
Figura 2.8 – Exemplo de carregamento coordenado em carga residencial	30
Figura 2.9 – Exemplo de carregamento coordenado em carga não residencial	30
Figura 2.10 – Coordenação Religador-Fusível	34
Figura 3.1 – Fluxograma dos procedimentos utilizados para obtenção dos resultados	35
Figura 3.2 – Curva de carga residencial	36
Figura 3.3 – Carregador Veicular ABB EVLunic Basic 11kW/32A	38
Figura 3.4 – Soma da Curva de Carga das 16 Unidades Consumidoras	39
Figura 3.5 – Curva de carga das 00:00 até às 03:59	41
Figura 3.6 – Curva de carga das 18:00 até às 21:59	42
Figura 4.1 – Curva de carga para o carregamento descoordenado com 25% dos VEs.....	44
Figura 4.2 – Curva de carga para o carregamento coordenado com 25% dos VEs	45
Figura 4.3 – Curva de carga para o carregamento descoordenado com 50% dos VEs.....	46
Figura 4.4 – Curva de carga para o carregamento coordenado com 50% dos VEs	47
Figura 4.5 – Curva de carga para o carregamento descoordenado com 75% dos VEs.....	49
Figura 4.6 – Curva de carga para o carregamento coordenado com 75% dos VEs	50
Figura 4.7 – Curva de carga para o carregamento descoordenado com 100% dos VEs.....	51
Figura 4.8 – Curva de carga para o carregamento coordenado com 100% dos VEs	52
Figura 4.9 – Curva de carga para o carregamento coordenado e descoordenado, ambos com 25% dos VEs.....	56
Figura A.1 – Curva de carga UC 1	63
Figura A.2 – Curva de carga UC 2	63
Figura A.3 – Curva de carga UC 3	64
Figura A.4 – Curva de carga UC 4	64
Figura A.5 – Curva de carga UC 5	65
Figura A.6 – Curva de carga UC 6	65
Figura A.7 – Curva de carga UC 7	66
Figura A.8 – Curva de carga UC 8	66
Figura A.9 – Curva de carga UC 9	67
Figura A.10 – Curva de carga UC 10.....	67
Figura A.11 – Curva de carga UC 11.....	68
Figura A.12 – Curva de carga UC 12.....	68
Figura A.13 – Curva de carga UC 13.....	69
Figura A.14 – Curva de carga UC 14.....	69
Figura A.15 – Curva de carga UC 15.....	70
Figura A.16 – Curva de carga UC 16.....	70
Figura B.1 – Curva de carga para o carregamento coordenado e descoordenado, com 75% - 25%.....	71

LISTA DE FIGURAS

Figura B.2 – Curva de carga para o carregamento coordenado e descoordenado, com 50% - 50%.....	72
Figura B.3 – Curva de carga para o carregamento coordenado e descoordenado, com 25% - 75%.....	73

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Modos de recarga de baterias para Veículos Elétricos	23
Tabela 3.1 – Veículos elétricos disponíveis no Brasil	37
Tabela 3.2 – Carregador Veicular ABB EVLunic Basic 11kW/32A	38
Tabela 3.3 – Dados de recarga.....	40
Tabela 4.1 – Resultados do Carregamento descoordenado para 25% dos VEs conectados	44
Tabela 4.2 – Resultados do Carregamento coordenado para 25% dos VEs conectados.....	45
Tabela 4.3 – Resultados do Carregamento coordenado para 50% dos VEs conectados.....	47
Tabela 4.4 – Resultados do Carregamento coordenado para 50% dos VEs conectados.....	48
Tabela 4.5 – Resultados do Carregamento descoordenado para 75% dos VEs conectados	49
Tabela 4.6 – Resultados do Carregamento coordenado para 75% dos VEs conectados.....	50
Tabela 4.7 – Resultados do Carregamento descoordenado para 100% dos VEs conectados	52
Tabela 4.8 – Resultados do Carregamento coordenado para 100% dos VEs conectados.....	53
Tabela 4.9 – Comparativo de resultados para 25% e 50% dos VEs.....	54
Tabela 4.10 – Comparativo de resultados para 75% e 100% dos VEs	54
Tabela 4.11 – Resultados obtidos pelo Cenário Ideal.....	56
Tabela B.1 – Resultados obtidos 75%-25%.....	71
Tabela B.2 – Resultados obtidos 50%-50%.....	72
Tabela B.3 – Resultados obtidos 25%-75%.....	73

LISTA DE APÊNDICES

Apêndice A – Curvas de Carga das Unidades Consumidoras	63
Apêndice B – Casos Especiais	71

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 JUSTIFICATIVA	13
1.2 OBJETIVOS	14
1.2.1 Objetivos Gerais	14
1.2.2 Objetivos específicos	14
1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	14
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1 VEÍCULOS ELÉTRICOS	16
2.1.1 Veículos Híbridos	18
2.1.2 Veículos puramente elétricos	18
2.2 CARREGAMENTO DE VEÍCULOS ELÉTRICOS	21
2.2.1 Velocidade de Carregamento	23
2.3 SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA	24
2.3.1 Demanda residencial	24
2.4 TARIFAÇÃO	25
2.5 ESTRATÉGIAS DE CARREGAMENTO	27
2.5.1 Carregamento descoordenado	28
2.5.2 Carregamento coordenado	29
2.6 IMPACTOS CAUSADOS PELO CARREGAMENTO DE VEÍCULOS ELÉTRICOS NO SDEE	31
2.6.1 Sobrecarga de Transformadores	31
2.6.2 Distorções Harmônicas	32
2.6.3 Fator de Potência	32
2.6.4 Estabilidade de Tensão	32
2.6.5 Proteção do Sistema Elétrico de Potência	33
3 METODOLOGIA	35
3.1 CENÁRIOS ABORDADOS	35
3.1.1 Definição dos Parâmetros de recarga do VE	36
3.1.1.1 Curva de Carga e Horários de Recarga	36
3.1.1.2 Veículo Elétrico	37
3.1.1.3 Carregador Veicular	38
3.2 AMBIENTE DE ANÁLISE	39
3.2.1 Carregamento coordenado (00:00 - 03:59)	41
3.2.2 Carregamento descoordenado (18:00 - 21:59)	41
4 ESTUDO DE CASO	43
4.1 SIMULAÇÕES	43

4.1.1 Cenário 1: 25%	43
4.1.1.1 <i>Carregamento Descoordenado</i>	44
4.1.1.2 <i>Carregamento Coordenado</i>	45
4.1.2 Cenário 2: 50%	46
4.1.2.1 <i>Carregamento Descoordenado</i>	46
4.1.2.2 <i>Carregamento Coordenado</i>	47
4.1.3 Cenário 3: 75%	48
4.1.3.1 <i>Carregamento Descoordenado</i>	49
4.1.3.2 <i>Carregamento Coordenado</i>	50
4.1.4 Cenário 4: 100%	51
4.1.4.1 <i>Carregamento Descoordenado</i>	51
4.1.4.2 <i>Carregamento Coordenado</i>	52
4.1.5 Resultados	54
4.1.6 Cenário Ideal	55
5 CONCLUSÃO	58
5.1 TRABALHOS FUTUROS	59
REFERÊNCIAS	60
APÊNDICES	62
B.1 DESC. 75% E COORD. 25%	71
B.2 DESC. 50% E COORD. 50%	72
B.3 DESC. 25% E COORD. 75%	73

1 INTRODUÇÃO

Os Veículos Elétricos (VEs) vêm ganhando importância nos dias de hoje e são considerados uma tendência para um futuro próximo no que diz respeito a transporte e mobilidade. Segundo Baran (2011), ao contrário do que muitas pessoas acreditam, a tecnologia dos automóveis elétricos não representa uma inovação tecnológica recente e os VEs já foram fortes concorrentes dos automóveis de combustão interna. Embora haja avanços tecnológicos importantes nos VEs atuais, como as baterias de íon de lítio e toda a tecnologia digital presente nos carros modernos, em essência o conceito básico se mantém até hoje. Ou seja, não houve mudanças radicais nos motores elétricos de hoje, nem mesmo na utilização da energia cinética gerada pelo movimento do veículos.

A inserção de VEs constitui uma possível solução para a mobilidade urbana que assegura o deslocamento com impactos reduzidos ao meio ambiente (BORBA, 2012). Além disso, tais veículos representam uma solução a longo prazo, capazes de reduzir as emissões de poluentes e diversificar a matriz energética no setor de transportes, hoje muito dependente de combustíveis fósseis (BARASSA, 2015).

Tendo isso como base, é possível afirmar que o crescimento no número de VEs durante os próximos anos causará uma mudança no setor energético, principalmente no sistema de distribuição de energia elétrica (SDEE), o qual será responsável por abastecer esses veículos.

Atualmente, há diversas formas de carregamento que se divide em coordenado e descoordenado e são utilizados de acordo com as necessidades do consumidor. Sendo assim, é de se esperar que a transição de veículos convencionais para VEs cause um aumento significativo na demanda por energia elétrica e altere o perfil de cargas do sistema.

Para tornar a implantação dos VEs algo viável ao SDEE atual, é necessário esclarecer quais são e como mitigar eventuais problemas que afetarão à rede elétrica durante essa transição.

1.1 JUSTIFICATIVA

Seguindo a tendência mundial por uma gestão mais eficiente de recursos energéticos, a implantação em massa de VEs deixou de ser apenas uma possibilidade e atualmente faz parte da realidade de diversos países. Um exemplo é a declaração de países europeus, como a França, afirmando que pretende acabar com a fabricação de veículos que funcionem, exclusivamente, a base de gasolina e diesel, até o ano de 2040 (CNN, 2017).

Sendo assim, com a presença do Brasil entre os países emergentes, há um grande potencial no país para a realização de investimentos no setor de VEs nos próximos anos. Dessa forma, justifica-se a importância de investigar estratégias que reduzam os impactos

que o carregamento de VEs podem causar na rede elétrica.

1.2 OBJETIVOS

Observando esses veículos como sendo uma simples carga, têm-se uma grande quantidade de energia sendo consumida durante o seu carregamento, causando um aumento considerável no uso de energia elétrica de um consumidor residencial. Uma das preocupações é evitar que haja sobrecarga na rede devido a grande quantidade de VEs sendo conectados ao SDEE durante, principalmente, horários de pico. Com isso, é esperado que haja um controle de qualidade da energia elétrica sendo distribuída pelas concessionárias.

Para isso, com um intuito preditivo, será feita uma análise econômica do impacto causado por VEs no sistema de distribuição quando há essa migração do uso de veículos convencionais à combustão, para VEs. Essa análise tem como finalidade utilizar a tarifa branca e o auxílio de estratégias de carregamento, para que seja possível reduzir a demanda por energia elétrica causada pelo carregamento de veículos elétricos.

1.2.1 Objetivos Gerais

O objetivo geral desse trabalho é a realização do estudo quanto ao impacto que a conexão de VEs causa no SDEE. Abordando estratégias de carregamento e modalidades tarifárias, validando sua efetividade em evitar sobrecargas e reduzir o valor na conta de energia elétrica do consumidor.

1.2.2 Objetivos específicos

- Modelar a curva de carga de um conjunto residencial;
- Simular diferentes cenários de conexão de VEs;
- Categorizar possíveis impactos causados à rede elétrica;
- Verificar a viabilidade do uso de modalidades tarifárias e carregamento coordenado, com o objetivo de reduzir o aumento de carga causado pelo carregamento de VEs.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho está estruturado da seguinte forma: no capítulo 2 será apresentada uma revisão bibliográfica do qual descreve os veículos elétricos, com sua história, com-

ponentes, características de consumo e carregamento, a rede de distribuição de energia elétrica, as modalidades tarifárias em vigor, as estratégias de carregamento e os impactos causados pelo carregamento de VEs, retratando as vantagens e desvantagens dessa conexão em massa.

No capítulo 3 encontra-se a metodologia desenvolvida para esse trabalho, onde é apresentada a metodologia utilizada no desenvolvimento, escolha dos parâmetros de carregamento e descrição do ambiente de análise utilizado dos cenários que serão abordados durante o estudo de caso.

No capítulo 4 é realizado o Estudo de Caso, onde, por sua vez, é aplicada a metodologia através das simulações. Em seguida, é apresentada uma discussão referente aos resultados obtidos. Por fim, é atribuído um cenário ideal de carregamento, com o objetivo de reduzir o incremento de carga causado pela conexão dos VEs, onde, também, é utilizado para fazer as considerações finais perante o estudo de caso realizado.

Com o término do estudo de caso, têm-se o capítulo 5, no qual apresenta as conclusões obtidas no desenvolvimento desse trabalho, alguns destaques e propostas para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo é apresentado uma revisão bibliográfica relacionada ao tema de Impacto do carregamento de veículos elétricos, reunindo as informações e metodologias utilizadas para o desenvolvimento desse trabalho. Dentro dele está disposta uma apresentação geral do assunto, os Veículos Elétricos, a rede de distribuição de energia, as tarifações em vigor durante o desenvolvimento desse trabalho e os impactos causados pelo carregamento de VEs ao sistema de distribuição.

Na seção de VEs encontra-se sua história, motivos que impulsionaram e também desestimularam sua produção ao longo do tempo, os principais componentes utilizados em sua construção. Além disso, também será exposto as características de consumo e como funciona o carregamento de tais veículos. Na terceira seção, é visto uma breve introdução ao funcionamento do sistema de distribuição de energia elétrica e como é aplicada a tarifação às unidades consumidoras, realizando um comparativo entre a tarifa convencional e a tarifa branca. Na quarta seção, é discutido diferentes estratégias de carregamento de VEs e como elas são aplicadas atualmente. Por fim, é feita uma descrição quanto aos principais impactos referentes ao carregamento de VEs.

2.1 VEÍCULOS ELÉTRICOS

Os veículos elétricos, apesar de serem popularmente reconhecidos como uma tecnologia recente, tiveram, na verdade, sua primeira aparição em meados de 1830, utilizando baterias não recarregáveis, razão que tornava-os pouco atrativos. Pelo final do século XIX, com a produção em massa de baterias recarregáveis, VEs passaram a ser utilizados (LARMINE; LOWRY, 2003). A Figura 2.1 demonstra um veículo elétrico sendo utilizado como táxi no início do século XX e comprova a sua preferência na época em relação aos seus concorrentes diretos, os veículos com motor de combustão e a vapor.

Figura 2.1 – Veículo elétrico usado como táxi em Nova Iorque em 1901



Fonte: (LARMINE; LOWRY, 2003)

Porém, de acordo com Larmin e Lowry (2003), os VEs perderam espaço para os de combustão interna devido ao seu alto custo e da baixa eficiência das baterias da época em relação aos combustíveis provenientes do petróleo. Ainda segundo eles, ironicamente, a bateria, antes utilizadas nos VEs, passou a ser utilizada para dar a partida em motores a combustão.

Os anos entre 1920 e 1970 marcaram uma época de baixo interesse no mercado de VEs. A depressão da década de 1930, seguida pela Segunda Guerra Mundial, prejudicou um possível ressurgimento quanto a pesquisa e desenvolvimento de veículos com base em energias alternativas. Mesmo no período de prosperidade econômica pós guerra, os projetos de VEs permaneceram estagnados devido a pouca preocupação ambiental, recursos naturais em abundância e ao desinteresse relacionado a sustentabilidade (ANDERSON; ANDERSON, 2010).

Devido a crise do petróleo em 1970, com ondas de racionamento do combustível e a necessidade de reduzir a exploração de recursos não renováveis a opinião pública começou a se voltar para os problemas ambientais. Com isso os VEs voltaram a atrair a atenção das grandes montadoras. Nesse período, grandes montadoras como a *Ford Motor Company* e a *General Motors* desenvolveram protótipos de VEs, porém, nem os automóveis híbridos, nem os puramente elétricos foram capazes de competir no mercado de veículos de combustão (BARAN; LEGEY, 2011).

No Brasil, este movimento em favor do carro elétrico surgiu no final da década de 1970 e início da década de 1980, com a parceria da Gurgel S.A. e Furnas Centrais Elétricas S.A. que desenvolveram dois modelos de VEs, chamados Itaipu Elétrico e Itaipu 400, como alusão à usina hidrelétrica. Todavia, medidas de racionalização e substituição do petróleo

no mesmo período, como Programa Nacional do Álcool (Pró-Álcool), e os problemas de elevado custo dos VEs, somados com a baixa autonomia dos veículos, fizeram com que estes carros não ganhassem espaço no mercado (BORBA, 2012).

Porém, após dois séculos de sua primeira aparição, com os avanços tecnológicos, houve um aumento significativo na autonomia e eficiência desses VEs. Sendo assim, com o intuito de ganhar espaço no mercado, diminuir a dependência do petróleo e reduzir o dano causado ao meio ambiente, os VEs estão voltando a se tornar atrativos, fazendo com que diversas montadoras de veículos já possuam suas alternativas aos veículos de combustão interna. Em 1997, graças aos esforços da Toyota, com o lançamento do veículo híbrido Prius no mercado japonês, seguido pelo lançamento do Honda Insight no mercado americano houve um aumento na demanda por VEs, dando espaço para um novo mercado averso ao de veículos combustão (DIJK; YARIME,). Portanto, junto aos veículos puramente elétricos será feita uma descrição referente ao funcionamento dos veículos híbridos.

2.1.1 Veículos Híbridos

Um veículo híbrido, por definição, é um automóvel que possui mais de um motor de propulsão. A forma mais empregada e estudada, é a que combina motor de combustão interna e motor elétrico. Entretanto, vale ressaltar que mesmo por utilizarem baterias menores, que apenas auxiliam no funcionamento do motor principal de combustão, as metodologias de análise do impacto de seu carregamento no sistema de distribuição, continuam válidas e, portanto, também são utilizadas para avaliar o impacto do carregamento de veículos puramente elétricos.

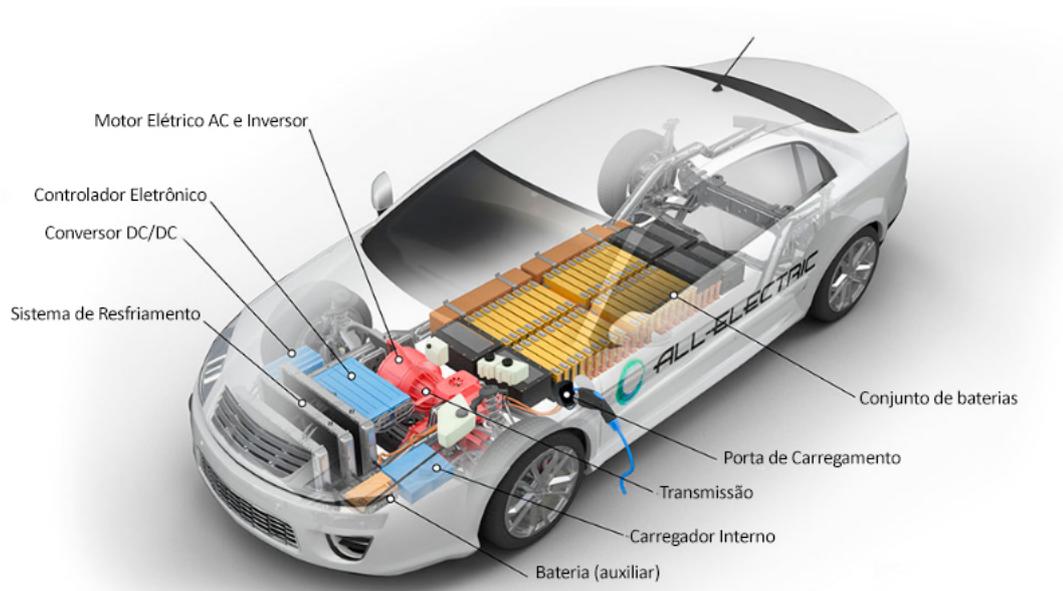
2.1.2 Veículos puramente elétricos

Os veículos puramente elétricos são assim chamados porque possuem apenas a bateria como fonte de energia. Em termos de desempenho, tais veículos já se equiparam aos veículos convencionais, com motor de combustão interna, mas é na autonomia, no tempo de recarga e no custo que ainda estão os maiores entraves dessa abordagem tecnológica (PUPO, 2012). Porém, com o desenvolvimento acelerado desse mercado tais problemas estão deixando de ser os maiores empecílhos na expansão dos VEs. Uma vez que, atualmente, existam veículos como o Tesla Model S, que possui autonomia de até 500 km.

Veículos elétrico possuem um motor elétrico de corrente alternada ao invés de motores de combustão interna. O veículo usa um grande conjunto de baterias para trans-

mitir a potência necessária para o motor elétrico e por conta disso, precisa ser conectado a uma estação de carregamento ou a um carregador externo para realizar sua recarga. Por funcionar via eletricidade o veículo não emite ruídos e não necessita dos equipamentos normalmente instalados em veículos de combustão, reduzindo assim a quantidade de equipamentos necessários para seu funcionamento (ENERGY, 2019). A Figura 2.2 representa quais são os componentes principais necessários para o funcionamento de um veículo elétrico.

Figura 2.2 – Componentes principais de um Veículo Elétrico



Fonte: Adaptado de (ENERGY, 2019)

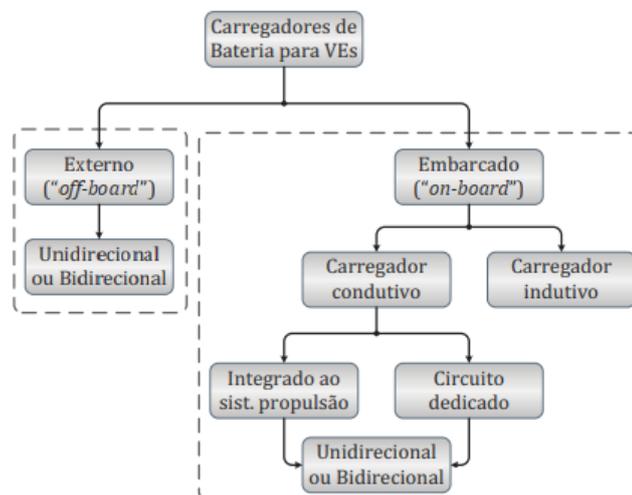
- **Motor Elétrico AC e Inversor:** Esse conjunto utiliza a energia proveniente do conjunto de baterias para movimentar o veículo. O inversor, quando aliado a motores de indução, faz o controle da frequência de operação e conseqüentemente da velocidade do veículo.
- **Controlador Eletrônico:** Essa unidade controla o fluxo de energia elétrica entregue pelo conjunto de baterias.
- **Conversor DC/DC:** Esse equipamento converte a energia DC de alta tensão proveniente do conjunto de baterias, para uma tensão DC de menor amplitude utilizada para prover energia à outras partes do veículo.
- **Sistema de Resfriamento:** Esse sistema mantém a temperatura de operação adequada para todos os componentes do veículo, desde o motor elétrico até componentes internos.
- **Conjunto de Baterias:** Armazena e provê a eletricidade necessária para o funcionamento do motor elétrico.
- **Porta de Carregamento:** A entrada de energia utilizada para conectar o veículo a uma fonte de energia externa. Utilizada para realizar a recarga do veículo elétrico.
- **Transmissão:** A transmissão transfere a potência mecânica gerada pelo motor elétrico para o eixo e é utilizada para que seja possível conduzir o veículo.

- Carregador Interno: Converte a energia AC, proveniente da porta de carregamento, em DC para que seja possível alimentar o conjunto de baterias. Além disso, monitora as características da bateria, como tensão, corrente, temperatura e *state of charge* enquanto faz a recarga das baterias.
- Bateria (auxiliar): Provê energia para os acessórios do veículo.

2.2 CARREGAMENTO DE VEÍCULOS ELÉTRICOS

Há várias possibilidades para a caracterização dos carregadores de baterias de veículos elétricos, mas, de forma geral, pode-se classificá-los como "embarcados" (*on-board*) e "externos" (*off-board*) (YILMAZ; KREIN, 2012). Carregadores embarcados são associados à recarga noturna ou de oportunidade, enquanto os do tipo externo são relacionados às estações de recarga rápida (RODRIGUES, M. et. al., 2014). Porém, caso o proprietário do veículo optar pela instalação de um carregador externo, também é possível atrelar o carregamento externo a recargas mais lentas. A Figura 2.3 demonstra, através de um diagrama, as possíveis formas de realizar o carregamento de VEs.

Figura 2.3 – Classificação de carregadores para Veículos Elétricos.



Fonte: Adaptado de (RODRIGUES, M. et. al., 2014)

Dentre os parâmetros que podem ser observados durante a o carregamento de VEs, existem dois que auxiliam o usuário durante a recarga, sendo eles: o *state of charge* (estado de carga) e o tempo necessário para o carregamento.

O *state of charge* pode ser compreendido como sendo o estado de carregamento de um veículo elétrico, similar ao medidor de combustível de veículos convencionais. Nele é observado a porcentagem de energia restante na bateria do veículo elétrico após seu ciclo

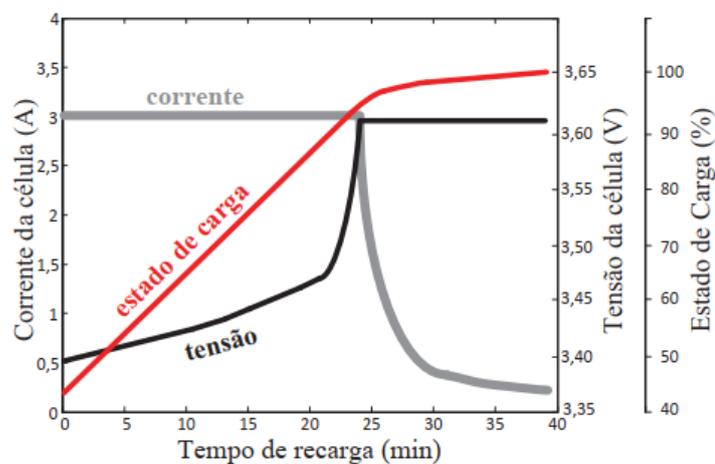
de consumo diário.

Já o tempo necessário para o carregamento é um parâmetro que expressa o número de intervalos de tempo necessários para que haja a carga completa do veículo elétrico de acordo com o seu requerimento energético previsto. Esses intervalos podem ser definidos tipicamente em horas ou até em valores de tempo menores, isso irá depender da precisão da demanda prevista. Para Shafiee et al. (2013), é possível afirmar que VEs devem ser carregados pelo menos uma vez por dia a cada dois dias, se usados diariamente.

Independente do tipo de bateria eletroquímica considerada, para garantir uma recarga segura e que sua vida útil seja preservada, é necessário que corrente e tensão sejam convenientemente controladas em suas células durante os processos de carga e descarga. O perfil de recarga típico de uma célula de bateria de lítio-ferro é apresentado na Figura 2.4, em que pode ser observada a divisão da recarga em duas etapas: uma etapa de corrente constante, com duração de cerca de 75% do tempo de recarga, e uma etapa de tensão constante, complementando a recarga. Além disso, a tensão das células da bateria deve ser monitorada durante todo o processo de recarga, de modo que não exceda o valor máximo recomendado pelo fabricante, o que causaria sérios danos ao produto.

Este monitoramento de tensão, bem como o da temperatura e da corrente nas células de uma bateria e o controle do carregador de baterias, é realizado por um BMS (sistema de gestão de bateria), que é fundamental para a operação segura de sistemas de armazenamento de energia baseados em baterias de íons de lítio. Além disso, para tal tipo de bateria, também é importante a existência de circuitos auxiliares de equalização de carga entre as células da bateria, de modo a garantir ótima operação do sistema de armazenamento de energia (RODRIGUES, M. et. al., 2014).

Figura 2.4 – Perfil de recarga de uma bateria de lítio-ferro.



Fonte: (RODRIGUES, M. et. al., 2014)

2.2.1 Velocidade de Carregamento

A velocidade de carregamento é um fator que depende de sua infraestrutura. Com base na IEC 61851-1, três diferentes níveis de carregamento são destacados.

- **Nível 1:** Utiliza o padrão de 120V-15A e é conhecido por possuir um carregamento lento, com média de 4 a 8 horas, podendo durar até 14 horas para uma carga completa. É um modelo raramente utilizado pois muitos países não utilizam esse nível de tensão de distribuição.
- **Nível 2:** Conhecido por ser o nível intermediário e possuir ampla utilização, principalmente por ser o padrão 240V-15A, seu tempo médio de carregamento é estimado entre 4 a 5 horas.
- **Nível 3:** Popularmente conhecido como *fast charging* possui altos níveis de tensão e corrente, chegando a alcançar 150kW. É o nível de carregamento mais rápido, levando de 10 a 25 minutos para realizar a carga de um veículo elétrico, porém, é o modelo de carregamento mais agressivo a linha de distribuição, o que resulta na necessidade de um estudo prévio à sua aplicação.

Dessa forma, pode-se organizar os três níveis de carregamento como é mostrado pela Tabela 2.1, onde são destacados os modos de recarga, suas principais características, a tensão e a corrente utilizada.

Tabela 2.1 – Modos de recarga de baterias para Veículos Elétricos

Modo de recarga	Característica/Aplicação	Tensão	Corrente
Modo 1	- Carga Lenta; - Modelo raramente utilizado pois muitos países não utilizam esse nível de tensão de distribuição.	$\geq 120V(1\phi)$ $\leq 240V(1\phi)$	16 A
Modo 2	- Carga intermediária; - Ampla utilização.	$\leq 240V(1\phi)$ $\leq 480V(3\phi)$	≥ 32 A
Modo 3	- Carga rápida (fast charging); - Possui altos níveis de tensão e corrente; - Estações de recarga.	-	-

Fonte: Adaptado de (RODRIGUES, M. et. al., 2014)

Ao observar os modos de recarga atualmente empregados, é necessário entender o funcionamento do sistema de distribuição de energia elétrica e como esse carregamento irá afeta-lo.

2.3 SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Após percorrer a extensão geográfica existente entre a geração e os centros consumidores por meio das linhas de transmissão, a energia elétrica chega às Estações Transformadoras de Distribuição (ETD). As ETD's constituem as subestações que rebaixam os níveis de tensão utilizados na transmissão, permitindo, assim, que seja iniciada a etapa de distribuição. Assim como ocorre com a transmissão, o sistema de distribuição de energia elétrica é composto por fios condutores, transformadores e equipamentos diversos de fixação, controle e proteção dos circuitos de distribuição. Entretanto, o sistema de distribuição é muito diferente da transmissão, devido a sua extensão e ramificação, tendo em vista a necessidade de alcançar todos os consumidores (BARROS; BORELI; GEDRA, 2014).

Além disso, o sistema de distribuição é composto por uma rede primária entre 2,3 kV e 44 kV e uma secundária, que pode variar entre 110 e 440 V. Com isso, devido a inserção de VEs, é provável que alguns tipos de carregamentos exijam que a rede elétrica de uma dada região seja reforçada (BORBA, 2012).

2.3.1 Demanda residencial

As residências e pequenos comércios são conectados à rede secundária de distribuição (BARROS; BORELI; GEDRA, 2014). Sendo assim, visto que a demanda por energia elétrica em um ambiente residencial é o foco desse trabalho, é necessário fazer uma análise prévia quanto ao comportamento de uma curva de carga residencial, para que seja possível adaptar as estratégias de carregamento de forma adequada e condizente.

Figura 2.5 – Curva de carga residencial



Fonte: Adaptado de (AES-SUL, 2001)

A Figura 2.5 representa uma curva de carga média obtida a partir da medição de 16 unidades consumidoras e retrata, de certa forma, o comportamento do consumidor de baixa tensão, com picos de demanda entre as 18:00 e 22:00 e baixo consumo durante a madrugada. Sendo assim, é seguro afirmar que o sistema tem capacidade de operar sem complicações quando não há uma extrapolação na demanda durante o período de pico.

Porém, a recarga de VEs sem coordenação adequada pode aumentar a carga média dos consumidores, causando picos de consumo indesejáveis. Além disso, essa recarga pode sobrecarregar transformadores e ultrapassar os limites térmicos das linhas de transmissão (SALDANHA, 2017). Para tentar reduzir a demanda por energia elétrica em períodos de pico, é necessário, primeiramente, entender como funciona a tarifa cobrada pela concessionária pelo seu uso, sendo assim as modalidades tarifárias atualmente empregadas para consumidores do Grupo B (inferior a 2,3 kV, residencial) serão apresentadas na próxima seção. Mais detalhes quanto as unidades consumidoras e suas respectivas curvas de carga serão discutidos na seção referente ao Estudo de Caso.

2.4 TARIFAÇÃO

O Serviço de Energia Elétrica é essencial no dia a dia da sociedade, seja nas residências ou nos diversos segmentos da economia. A tarifa visa assegurar aos prestadores dos serviços receita suficiente para cobrir custos operacionais eficientes e remunerar investimentos necessários para expandir a capacidade e garantir o atendimento com qualidade.

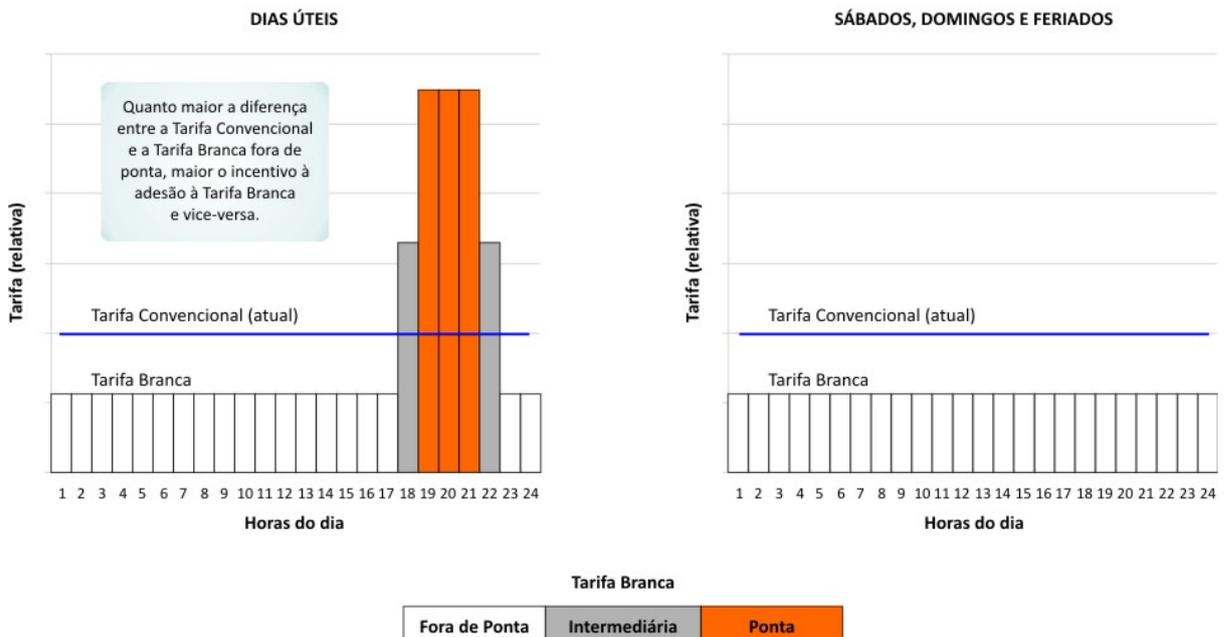
Os custos e investimentos repassados às tarifas são calculados pelo órgão regulador, e podem ser maiores ou menores do que os custos praticados pelas empresas (ANEEL, 2016).

Desde 2018, o Brasil passou a ter mais de uma modalidade tarifária. Dando espaço para o consumidor que, inicialmente, deveria arcar com a Tarifa Convencional, com um valor único (em R\$/kWh), passou a ter a Tarifa Branca como opção, destinada para consumidores cujo consumo anual com média mensal acima dos 500 kWh. A Tarifa convencional possui seu valor constante durante o dia e avalia apenas o consumo total mensal, em kWh, para realizar seu cálculo. Já a Tarifa Branca, é uma nova opção de tarifa que sinaliza aos consumidores a variação do valor da energia conforme o dia e o horário do consumo. Tais períodos podem ser observados nos itens à seguir:

- Horário de Ponta: Período composto por três horas diárias consecutivas definidas pela distribuidora, considerando a curva de carga de seu sistema elétrico (ANEEL, 2017). Se caracteriza por ser o período em que há maior demanda por energia elétrica.
- Horário Fora de Ponta período composto pelo conjunto das horas diárias consecutivas e complementares àquelas definidas pelo horário de ponta (ANEEL, 2017).
- Intermediário: é um período de transição de uma hora no início e fim das horas de pico.

Na Figura 2.6 há um comparativo entre a tarifa branca e convencional, onde é possível observar como esses horários impactam no valor cobrado pelo consumo de energia elétrica.

Figura 2.6 – Comparativo entre a Tarifa Branca e a Tarifa Convencional



Fonte: (ANEEL, 2019)

A partir disso, pode-se observar um incentivo para que haja redução na demanda por energia elétrica nos períodos de pico e um aumento no consumo durante o restante do dia. Sendo assim, com a implementação de VEs ao sistema, estratégias de carregamento aliadas às modalidades tarifárias, podem ser uma solução aos problemas gerados pela recarga desses veículos. Na seção à seguir, é apresentado algumas das estratégias que serão empregadas ao decorrer desse trabalho.

2.5 ESTRATÉGIAS DE CARREGAMENTO

Para que seja possível caracterizar os impactos dos veículos elétricos na rede é necessário conhecer, não apenas os veículos e o sistema de distribuição, mas também a forma que tais veículos são recarregados.

A recarga de VEs resultará em um aumento de carga no sistema de distribuição, o qual não foi projetado originalmente para acomodar VEs. O SDEE atual é capaz de suportar uma baixa penetração de VEs. Porém, há expectativa de haver um aumento significativo nos níveis de penetração durante os próximos anos causado, principalmente, pela redução de preço, disponibilidade de estações de carregamento e uma ampla gama de fabricantes desenvolvendo novos veículos. Esse aumento de carga irá causar impactos severos se não for gerido da maneira correta. Esses impactos incluem violações térmicas causadas pela sobrecarga no alimentador e transformadores, degradação dos níveis de tensão, aumento de perdas e de custos operacionais (LIU; DOW; LIU, 2011).

Além disso, o carregamento de VEs viola restrições impostas quanto a variação de tensão em linhas de distribuição rurais e causa sobrecarga em linhas urbanas. Tais restrições são importantes pois afetam mais do que apenas a qualidade de energia elétrica que chega ao consumidor, tornando a penetração de VEs em algo que pode afetar até em fatores como a confiabilidade dos dispositivos de proteção na rede de distribuição, resultando em desligamentos indevidos da rede para certos casos (VOUMVOULAKIS et al., 2017).

Ao observar esse crescimento de carga, temos que tal é caracterizado pelo aumento do consumo de energia elétrica e dentro de um ambiente residencial pode ser dado por duas situações, a adição de novos clientes à rede e diferentes usos para a eletricidade. Com a presença de VEs, esse tipo de veículo passa a fazer parte da carga total de uma rede de distribuição. Portanto, é necessário levar em consideração o crescimento de carga gerado por essa nova tecnologia e avaliar estratégias de carregamento que auxiliem, tanto ao consumidor, quanto a concessionária.

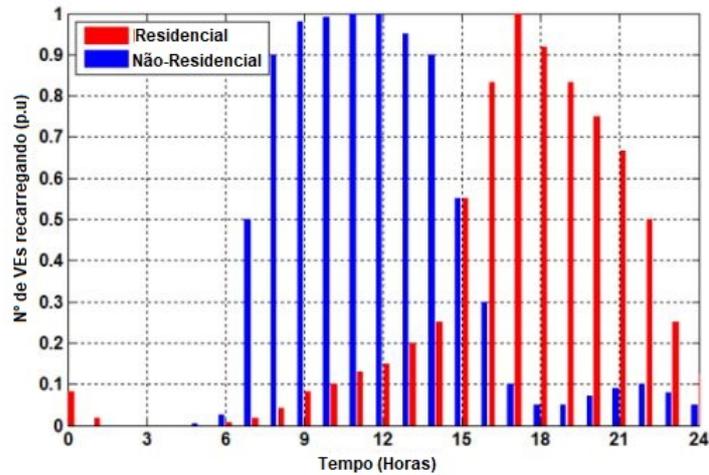
Formas apropriadas de recarga podem amenizar os problemas e permitir um número maior de VEs conectados a rede. Sendo assim, serão abordadas as estratégias de carregamento coordenadas e não coordenadas para que seja possível entender algumas das formas de carregamento atualmente disponíveis.

2.5.1 Carregamento descoordenado

O carregamento descoordenado, mais conhecido como *dumb charging*, pode ser considerado como a forma "não planejada" de penetração de VEs no SDEE. Onde o usuário conecta o seu veículo quando achar necessário, em qualquer ponto de carregamento.

Dessa forma, as baterias dos VEs começarão a ser recarregadas imediatamente quando chegarem em casa (normalmente durante horários de pico), ou após um período fixo pré-definido pelo usuário. A Figura 2.7 é um exemplo que demonstra o carregamento descoordenado de VEs, referente a hora de chegada em ambientes residenciais e não residenciais em relação ao número total de consumidores (em p.u) (ABUL'Wafa; EL'GARABLY; MOHAMED, 2017).

Figura 2.7 – Exemplo de carregamento descoordenado



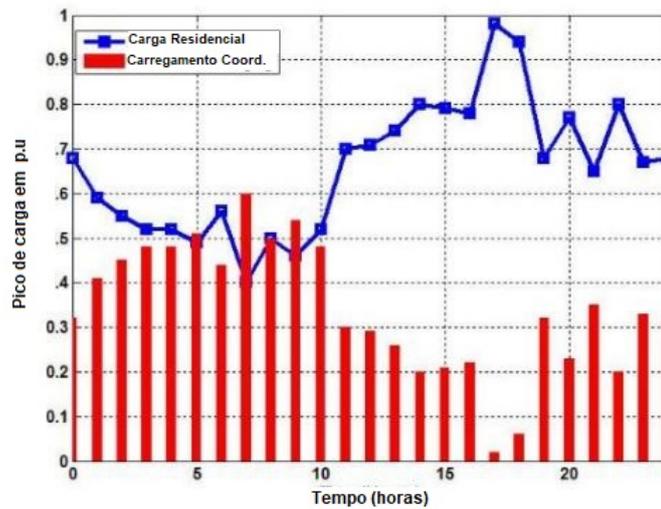
Fonte: Adaptado de (ABUL'Wafa; EL'GARABLY; MOHAMED, 2017)

Por se tratar de uma forma não planejada de carregamento, seu dano a rede de distribuição se torna difícil de ser previsto. Para isso surge a necessidade de avaliar outras estratégias de carregamento, coordenadas, com o intuito compará-las, avaliar seus impactos e garantir que o sistema de distribuição não seja afetado criticamente

2.5.2 Carregamento coordenado

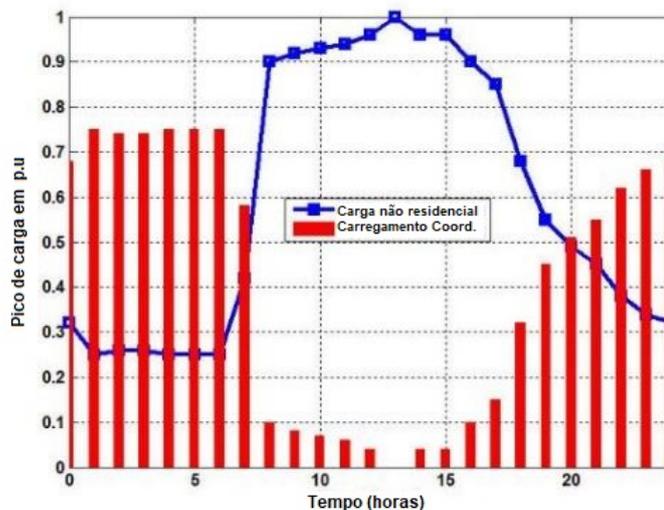
O carregamento coordenado trata de uma forma organizada e/ou planejada de fazer a recarga de VEs. O seu intuito é evitar que problemas na rede possam surgir, caso haja um grande aumento na quantidade de VEs em circulação. Sendo assim, uma estratégia que se encaixa nesse tipo de carregamento, é o *valley fill charging*. Nesse tipo de carregamento é assumido que os donos de VEs carreguem seus carros durante horas do dia em que a demanda de carga forma um "vale", ou seja, realizar a recarga fora dos horários de pico. As Figuras 2.8 e 2.9 são um exemplo do carregamento de VEs em relação a cargas residenciais e não residenciais (em p.u), respectivamente, porém, dessa vez, utilizando o carregamento coordenado.

Figura 2.8 – Exemplo de carregamento coordenado em carga residencial



Fonte: Adaptado de (ABUL'WAF; EL'GARABLY; MOHAMED, 2017)

Figura 2.9 – Exemplo de carregamento coordenado em carga não residencial



Fonte: Adaptado de (ABUL'WAF; EL'GARABLY; MOHAMED, 2017)

Sendo assim, ao analisar as figuras acima, pode-se observar que a recarga é feita com o objetivo direcionar o carregamento dos VEs de forma à garantir uma curva de carga contínua ao longo do dia, aumentando de forma proporcional o número de veículos realizando a recarga em períodos de baixa demanda e reduzindo tal quantidade em períodos de maior demanda, evitando sobrecargas e aumentando a quantidade de VEs realizando a recarga ao decorrer do dia.

2.6 IMPACTOS CAUSADOS PELO CARREGAMENTO DE VEÍCULOS ELÉTRICOS NO SDEE

A partir de estudos realizados por Marah et al.(2016), Shafiee et al.(2013) e Voumvoulakis et al.(2017) têm-se de forma clara que, a implantação em massa de veículos elétricos resulta em uma sensibilização do SDEE. Isso acontece porque a rede se depara com uma variação na curva de carga e nos níveis de tensão, uma mudança no fator de potência, distorções harmônicas e variações de potência que podem resultar até na descoordenação do sistema de proteção instalado.

Dessa forma, o carregamento descoordenado, deve ser evitado ao máximo caso a rede já esteja predisposta a alguma das consequências a seguir, uma vez que tal método não possui qualquer tipo de controle e resulta em instabilidades à rede.

Para garantir que a rede trabalhe de forma estável, uma breve análise é feita com o intuito de compreender o quanto a penetração de veículos elétricos impacta no SDEE.

2.6.1 Sobrecarga de Transformadores

Sendo considerado como a mais usual causa para faltas de eletricidade na rede, uma sobrecarga nos circuitos pode provocar falhas nos equipamentos e serve como a fonte principal dos demais problemas relacionados ao sistema de distribuição de energia elétrica. Tal aumento de carga provoca um estresse no isolamento e posterior falha por curtos-circuitos, liberando enorme energia durante o defeito (MOREIRA, 2016).

Dentre os equipamentos instalados na rede, o que sofre de forma imediata o aumento de carga são os transformadores. Em regra, a sobrecarga em transformadores é o resultado de um fluxo excessivo de corrente que percorre os enrolamentos do equipamento, causando aumento adicional de temperatura. Esta sobre temperatura pode causar a deterioração da isolação, afetando sua vida útil. Em um caso extremo, a sobrecarga pode provocar o incêndio do transformador (MONIZ, 2007).

A expectativa de vida útil média para um transformador de distribuição varia em um período em torno de 20 anos (COPEL, 2004). Porém, ao decorrer desse período, é possível que haja um aumento de carga superior ao fator de crescimento considerado na região em que o transformador foi instalado. Portanto, deve ser investigado o quanto a penetração de veículos elétricos contribui para tal aumento de carga, visto que isso pode se tornar uma das principais complicações à rede.

Na seção à seguir será discutida a presença de harmônicos na rede visto que, além da sobrecarga de transformadores, é esperado que hajam distorções harmônicas causadas pelos dispositivos eletrônicos envolvidos na recarga dos VEs.

2.6.2 Distorções Harmônicas

Dispositivos elétricos de potência envolvidos no carregamento de veículos elétricos, juntamente de bancos de capacitores, transformadores, relés de proteção e outros tipos de equipamentos atualmente presentes no SDEE serão os principais geradores de harmônicos. Tais distorções resultarão no aumento de perdas e, conseqüentemente, no decremento da qualidade da energia elétrica distribuída. Para isso, as distorções harmônicas podem ser tratadas por técnicas de modulação e diferentes análises, como o *Total Harmonic Distortion*(THD) (INGALE, R , 2014).

Outro fator avaliado na qualidade do funcionamento da rede elétrica é o fator de potência.

2.6.3 Fator de Potência

O fator de potência (FP) é definido pela relação entre a potência ativa e a potência aparente. Ou seja, valores baixos de fator de potência resultam em perdas de energia nos condutores e resultam na necessidade de aumentar a geração de energia (JENKINS, 2018). Quando é feita a análise do FP decorrente da penetração de veículo elétrico no SDEE, é necessário observar que tais veículos, por serem vistos pela rede como baterias, são cargas não lineares. Sendo assim, sempre que houver um aumento na potência reativa, o ângulo da defasagem entre a tensão e a componente fundamental da corrente também irá aumentar, afetando o valor do FP (SILVA et al., 2016) e influenciando na estabilidade do sistema.

2.6.4 Estabilidade de Tensão

Garantir a estabilidade dos níveis de tensão em linhas de distribuição de BT será um dos grandes desafios às concessionárias de energia elétrica, devido a penetração em massa dos veículos elétricos. Vários problemas decorrentes à estabilidade de tensão foram reportados em todo o mundo. Por conta disso, a integração de novas tecnologias será vista como uma necessidade para evitar um colapso na rede de distribuição de BT. Esse problema deve ser avaliado monitorando a brusca variação de carga no sistema, causada pelos diferentes perfis de carregamento de veículos elétricos de cada consumidor (MARAH, B. et al , 2016).

A estabilidade do Sistema Elétrico de Potência (SEP) é definida pela habilidade de recuperar o estado de equilíbrio de operação após ser exposto a um distúrbio físico de forma que todo o sistema permaneça intacto (ALSHAMLI et al., 2015). Seguindo a

mesma linha de pensamento, ALShamli et. al.(2015) acrescenta que a estabilidade nos níveis de tensão, como sendo a capacidade do SEP de manter um nível estável e aceitável de tensão em toda a rede, durante condições normais de operação ou após ser submetida a algum distúrbio.

Sendo assim, os principais equipamentos afetados por esses distúrbios são os equipamentos de proteção da rede. Portanto, seu funcionamento será discutido na seção abaixo.

2.6.5 Proteção do Sistema Elétrico de Potência

A proteção da rede de distribuição de energia elétrica é essencial para a instalação das redes públicas, pois quando há uma falta em algum trecho, as consequências podem causar danos ou o mal funcionamento de equipamentos instalados em casas, indústrias e hospitais. Portanto para que um sistema de proteção seja eficiente é necessário que haja o dimensionamento correto, que seja confiável, rápido, sensível a surtos e que haja coordenação e seletividade (GIULIANI, 2018).

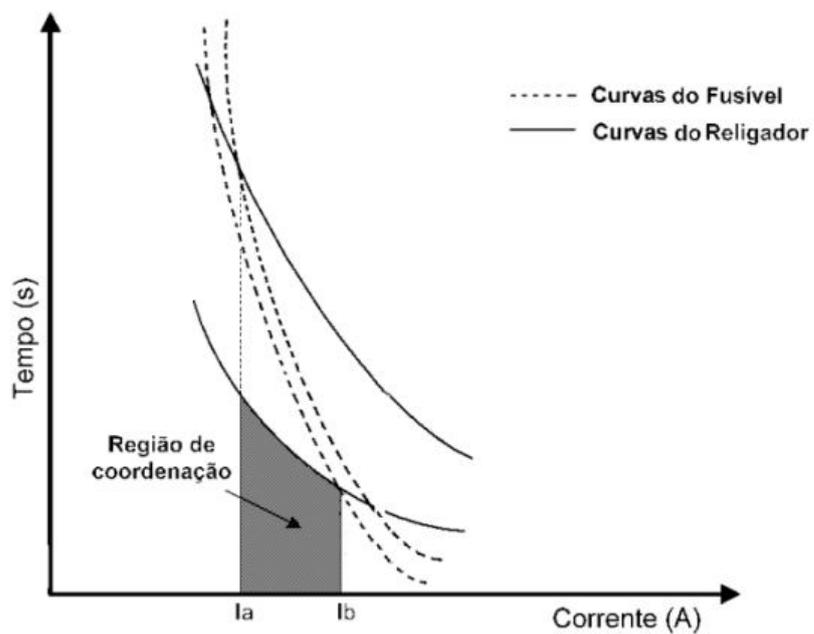
O valor de corrente de curto-circuito que circula em diversos pontos da rede representa o valor de corrente que os equipamentos devem atuar. Sendo assim, tal corrente representa o limite superior no dimensionamento e calibração dos equipamentos de proteção instalados no SDEE, como por exemplo, elos fusíveis e religadores.

Porém, além disso, durante a escolha dos elos e das curvas do religador, também é necessário levar em consideração o limite inferior, onde o sistema de proteção não deve atuar, e para isso, é considerado a corrente de carga do sistema. Ela representa o valor da corrente em condições normais de funcionamento da rede e durante o dimensionamento do sistema de proteção, é acompanhada por um fator de crescimento.

Com a penetração de veículos elétricos, o conseqüente aumento de demanda, alteração nos níveis de corrente, tensão e fator de potência, como descrito anteriormente, podem influenciar no funcionamento do sistema de proteção, principalmente no limite inferior de coordenação entre religadores e elos fusíveis. Portanto, para garantir o funcionamento correto dos equipamentos de proteção, é necessário que tais equipamentos não se encontrem fora dos limites de coordenação e seletividade estipulados durante o projeto da rede de proteção.

A Figura 2.10 representa um exemplo da coordenação das curvas de um religador e um elo fusível, onde I_a representa o valor da corrente de carga multiplicada por um fator de crescimento e I_b , a corrente de curto-circuito.

Figura 2.10 – Coordenação Religador-Fusível



Fonte: (GUARDA, 2012)

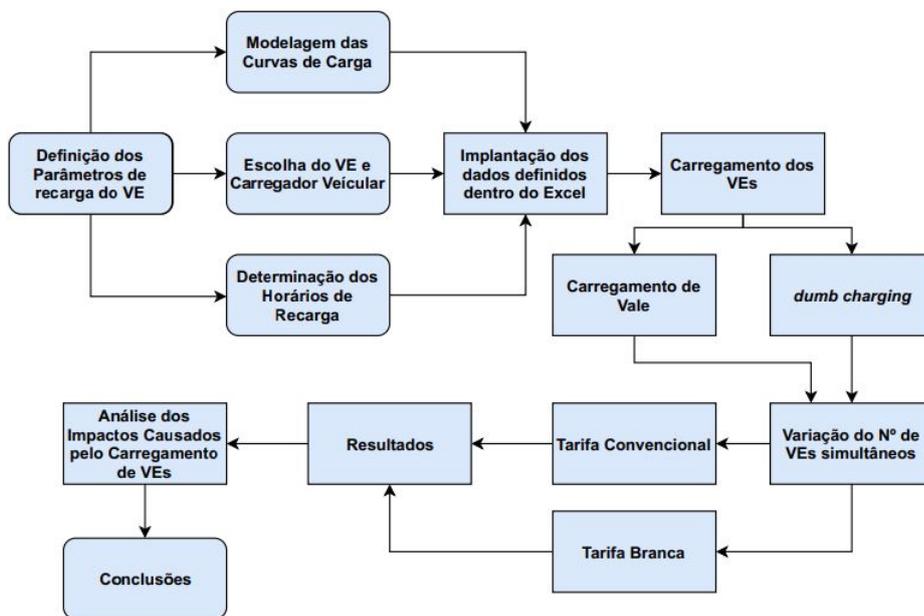
3 METODOLOGIA

Neste capítulo, será apresentado a metodologia utilizada e como ela será aplicada ao analisar as curvas de cargas residenciais disponibilizadas, com o objetivo de observar o carregamento coordenado e a influência da tarifação no carregamento de VEs.

3.1 CENÁRIOS ABORDADOS

Ao observar as possíveis mudanças que o carregamento de VEs na rede, têm-se de forma clara a necessidade de evitar tais impactos da forma mais eficiente possível. Dessa forma, os procedimentos descritos no fluxograma à seguir serão considerados como a metodologia empregada nesse trabalho para o desenvolvimento do próximo capítulo, referente ao Estudo de Caso.

Figura 3.1 – Fluxograma dos procedimentos utilizados para obtenção dos resultados



Fonte: Autor

Sendo assim, serão definidos os parâmetros utilizados durante o carregamento e o ambiente de análise será descrito a partir dos procedimentos descritos no fluxograma da Figura 3.1.

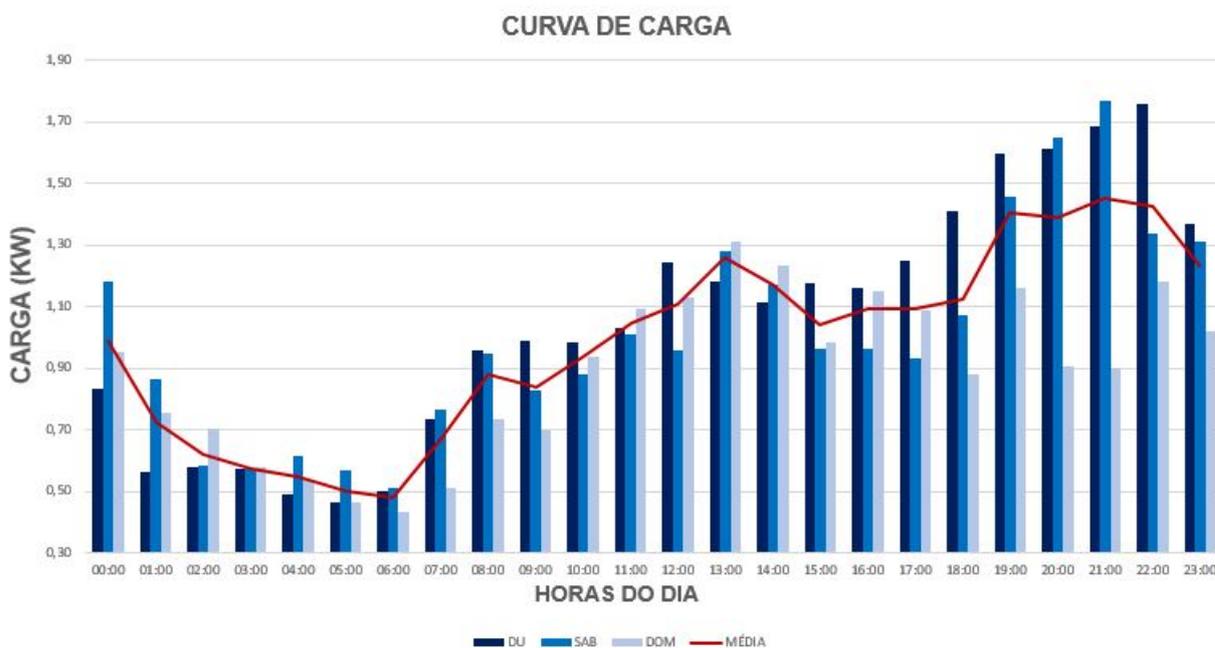
3.1.1 Definição dos Parâmetros de recarga do VE

3.1.1.1 Curva de Carga e Horários de Recarga

As curvas de carga utilizadas representam 16 unidades consumidoras de no mínimo 500 kWh/mês, das quais foram disponibilizadas para o autor durante o desenvolvimento do trabalho e podem ser encontradas no Apêndice A do documento. Tais curvas foram obtidas a partir de medições da AES Sul na cidade de Caxias do Sul. Essas unidades consumidoras servirão como base para essa análise e serão consideradas como sendo de uma região em comum. Esse grupo foi escolhido por caracterizar uma parte da população que se enquadra na norma da ANEEL de 2018, que solicita um consumo mensal superior a 500 kWh/mês, além de representar uma parcela da população com maior poder aquisitivo e, portanto, mais pertinente a adquirir um veículo elétrico.

A partir das curvas de cargas, foi possível obter uma que representa a média de consumo das 16 unidades consumidoras, retratado pela Figura 3.2. Onde o gráfico de barras em tons de azul representa o consumo médio referente aos dias úteis (DU), sábados e domingos. Já a linha em vermelho, representa a média de consumo entre os DU e finais de semana.

Figura 3.2 – Curva de carga residencial



Fonte: Adaptado de (AES-SUL, 2001)

A partir da curva de carga foram escolhidos dois períodos que possuem uma maior probabilidade do consumidor realizar a recarga de seu veículo elétrico e, mais ainda, serem

períodos que mais se distanciam da média de consumo calculada, de 0,98 kWh, com 1,36 kWh e 0,63 kWh. Sendo eles, respectivamente, o horário de ponta (carregamento descoordenado) e o período da madrugada (carregamento coordenado). Por conta disso, ambos serão priorizados durante a análise das curva de carga no Estudo de Caso.

- Período de ponta (18:00-22:00) foi escolhido por haver maior demanda por energia elétrica, além de haver uma predisposição de alguns consumidores realizarem a recarga assim que retornarem de seus ambientes de trabalho, tornando-o o período que representa o maior impacto no sistema de distribuição.
- Período da madrugada (00:00-06:59) ao contrário do restante do horário fora de ponta, a curva de carga durante esse período se assemelha com a forma de carregamento *valley fill charging*, além de ser considerado o período em que a maior parte dos proprietários de veículos elétricos estarão realizando a recarga de seus veículos.

3.1.1.2 Veículo Elétrico

A escolha do veículo elétrico é uma etapa necessária para que seja definido dentre as diversas características presentes em um VE, o fator que influencia a sua autonomia e o tempo que o veículo precisará ficar conectado à rede: a capacidade de armazenamento de energia da bateria (em kWh) .

Tabela 3.1 – Veículos elétricos disponíveis no Brasil

Modelo	Autonomia (km)	Bateria (kWh)
BMW i3	335	42
Chery Arrizo 5e	322	53
Chevrolet Bolt	383	60
JAC iEV20	320	41
JAC iEV40	-	40
Nissan Leaf	241	40
Renault Zoe	300	41

Fonte: Autor

Ao avaliar os veículos elétricos disponíveis no mercado brasileiro, representados pela Tabela 3.1, é possível observar e definir os parâmetros que sejam condizentes com o que deseja-se examinar quando aliados ao padrão de consumo das unidades consumidoras e os horários definidos para a recarga dos veículos.

Sendo assim, denominou-se o Chevrolet Bolt como o veículo de referência, por possuir a maior autonomia e bateria em relação aos seus concorrentes.

3.1.1.3 Carregador Veicular

A escolha do carregador veicular veio de forma arbitrária, buscando um modelo que atendesse as necessidades básicas de um consumidor residencial, de ampla utilização e um nível de carregamento intermediário, definido durante o Capítulo 2 como sendo o Nível 2 de recarga. Sendo assim, o modelo escolhido foi o ABB 11kW/32A, representado pela Figura 3.3 e com suas características descritas na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Carregador Veicular ABB EVLunic Basic 11kW/32A

Carregador	Voltagem (V)	Corrente (A)	P _{máx} (W)
ABB 11kW/32A	220	32	7040
	380	32	11000

Fonte: Autor

Com base nas características desse carregador e o padrão residencial composto por uma entrada monofásica de tensão entre 220 e 240V, têm-se que, nesse modo de operação, a potência máxima disponibilizada durante o período de recarga será de 7,04 kW.

Figura 3.3 – Carregador Veicular ABB EVLunic Basic 11kW/32A

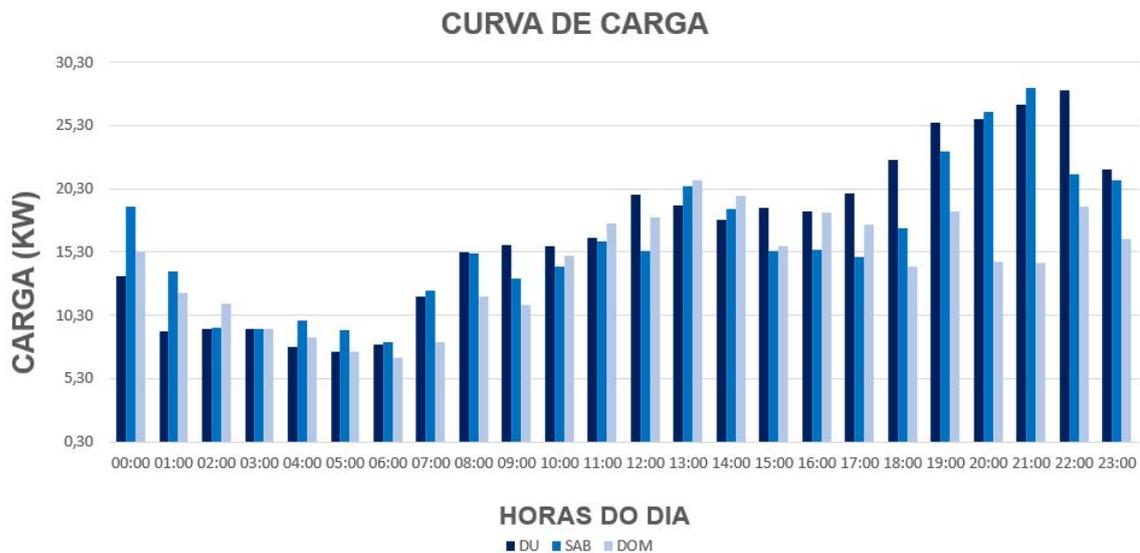


Fonte: (ABB, 2019)

3.2 AMBIENTE DE ANÁLISE

No ambiente de análise, a curva de carga utilizada, demonstrada pela Figura 3.4, representa a soma da demanda das 16 unidades consumidoras e servirá de base para todas as simulações. Esse agrupamento foi feito para que as UCs fossem analisadas em conjunto, possibilitando que os valores de carga dos VEs, quando inseridos, fossem variados de forma percentual, não influenciando individualmente a demanda de cada UC.

Figura 3.4 – Soma da Curva de Carga das 16 Unidades Consumidoras



Fonte: Autor

Após a definição inicial dos parâmetros de carregamento, é necessário enquadrá-los de forma apropriada à capacidade dos equipamentos escolhidos. Sendo assim, os dados que serão utilizados durante as simulações estão dispostos de acordo com a Tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Dados de recarga

Parâmetros de Recarga	
VE (Bateria)	60 kWh
SOC*	50%
Carga necessária	30 kWh
P _{máx} de Recarga	7,04 kW
Tempo necessário p/ o carregamento	4 horas
Horários de Recarga	
Carregamento Descoordenado	18:00 às 21:59
Carregamento Coordenado	00:00 às 03:59
	25%
	50%
Variação do número de VEs	75%
	100%

Fonte: Autor

Pode-se observar que a partir dos dados definidos, o tempo necessário de carregamento, obtido através da Equação 3.1, foi de 4 horas.

$$t = \frac{Bat * SOC}{P_{max}} = \frac{60kWh * 0,5}{7,04kW} = 4h \quad (3.1)$$

Onde,

t: tempo necessário para realizar a recarga (horas);

Bat: capacidade da bateria (kWh);

SOC: carga restante na bateria (%);

P_{max} : Potência máxima do carregador (kW).

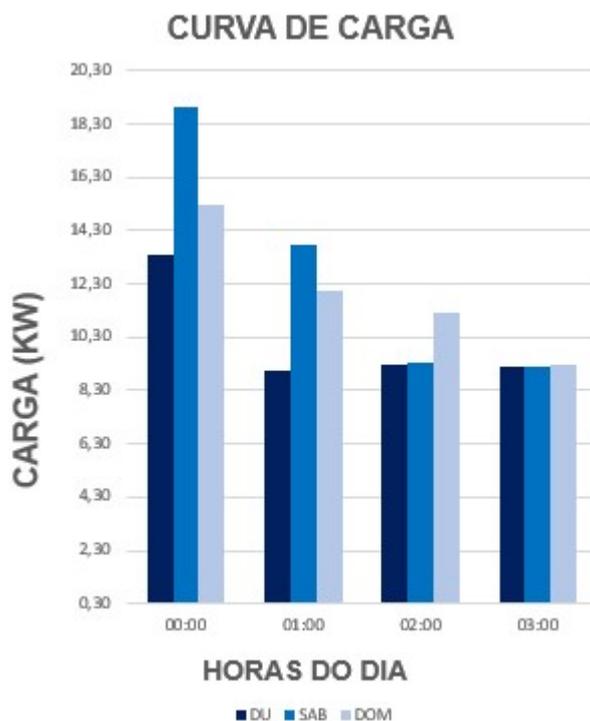
Então, ao analisar a curva de carga desse conjunto residencial, juntamente ao tempo de recarga recentemente obtido, pode-se adequar aos dois períodos previamente definidos para o carregamento.

3.2.1 Carregamento coordenado (00:00 - 03:59)

Esse período da madrugada, descrito anteriormente como sendo entre a 00:00 e 06:59, representa o carregamento coordenado e, por conta do tempo de carregamento definido em 4 horas, foi reduzido em duas horas.

A Figura 3.5 destaca esse período e demonstra onde será feito o incremento de carga durante o carregamento coordenado.

Figura 3.5 – Curva de carga das 00:00 até às 03:59

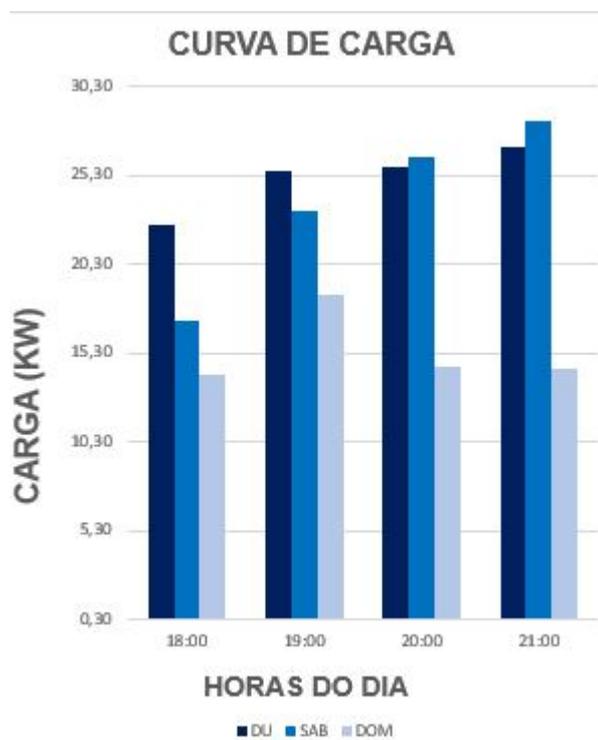


Fonte: Autor

3.2.2 Carregamento descoordenado (18:00 - 21:59)

De forma análoga ao período entre 00:00 e 03:59, a Figura 3.6 representa onde há o pico de demanda da rede, e demonstra aonde será feito o incremento de carga durante o carregamento descoordenado.

Figura 3.6 – Curva de carga das 18:00 até às 21:59



Fonte: Autor

4 ESTUDO DE CASO

Este capítulo tem a finalidade de expor o que foi feito durante o estudo de caso, apresentar as simulações de diferentes cenários e discutir os resultados obtidos. Dentro dele estará disposto os seguintes itens:

- Simulações;
- Resultados;
- Cenário Ideal.

4.1 SIMULAÇÕES

As simulações são efetuadas e apresentadas de acordo com o número de veículos que estão conectados, possibilitando que uma comparação direta entre o carregamento coordenado e descoordenado seja feita. Após a apresentação das simulações, é abordado um cenário, definido pelo autor, como sendo o ideal para recarga dos VEs e, por fim, será discutido os resultados obtidos junto as considerações finais do capítulo.

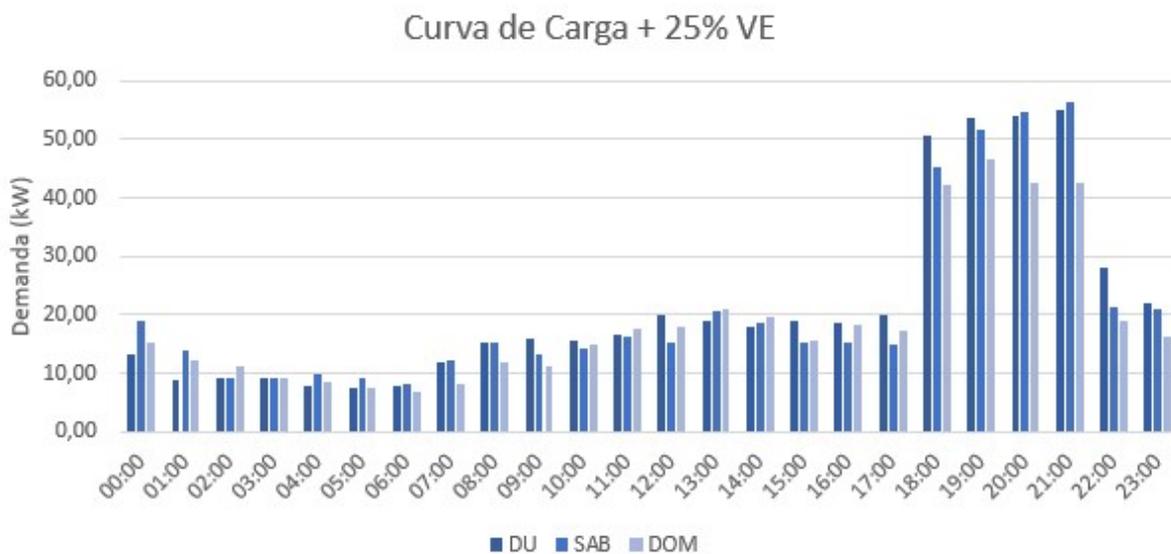
Vale ressaltar, que os valores tarifários aplicados no desenvolvimento desse trabalho são os disponibilizados pela RGE-Sul de 2019, sendo ambos isentos de impostos.

4.1.1 Cenário 1: 25%

No Cenário 1, é feita a recarga de apenas 25% simultaneamente, tais resultados estão divididos de acordo com o seu tipo de carregamento, sendo eles, respectivamente, descoordenado e coordenado.

4.1.1.1 Carregamento Descoordenado

Figura 4.1 – Curva de carga para o carregamento descoordenado com 25% dos VEs



Fonte: Autor

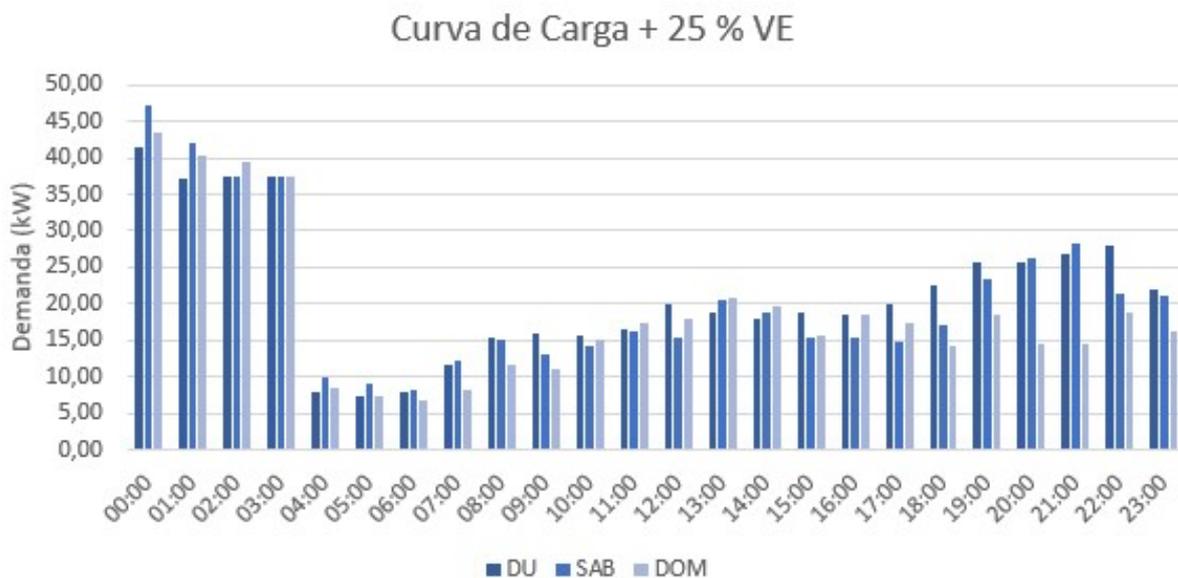
Tabela 4.1 – Resultados do Carregamento descoordenado para 25% dos VEs conectados

Resultados			
Tipo de carregamento		Descoordenado (18:00 às 21:59)	
Número de VEs conectados		25%	
Pico de Carga	(s/VE)	28,31 kW	
	(c/VE)	84,64 kW	
Aumento de carga		100%	
Consumo	(s/VE)	11.822,47 kWh	
	(c/VE)	15.191,67 kWh	
Tarifa	(s/VE)	Convencional	Branca
	(c/VE)	R\$ 6.465,20	R\$ 8.214,13
		R\$ 8.314,71	R\$ 11.489,25

Fonte: Autor

4.1.1.2 Carregamento Coordenado

Figura 4.2 – Curva de carga para o carregamento coordenado com 25% dos VEs



Fonte: Autor

Tabela 4.2 – Resultados do Carregamento coordenado para 25% dos VEs conectados

Resultados			
Tipo de carregamento		Coordenado (00:00 às 03:59)	
Número de VEs conectados		25%	
Pico de Carga	(s/VE)	28,31 kW	
	(c/VE)	47,07 kW	
Aumento de carga		66%	
Consumo	(s/VE)	11.822,47 kWh	
	(c/VE)	15191,67 kWh	
Tarifa		Convencional	Branca
	(s/VE)	R\$ 6.465,20	R\$ 8.214,13
(c/VE)	R\$ 8.314,71	R\$ 10.225,43	

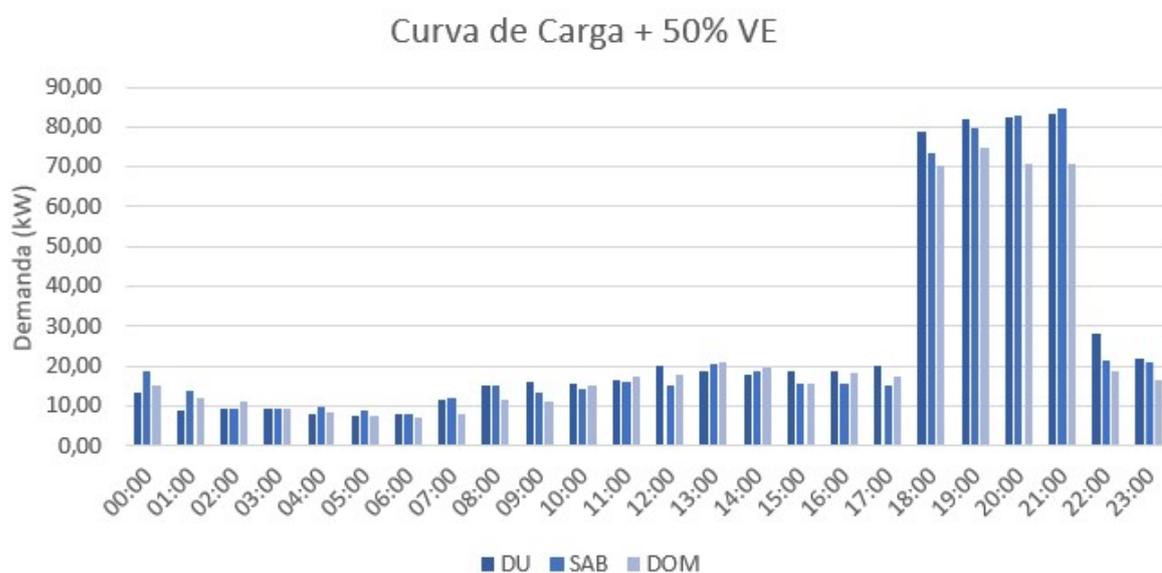
Fonte: Autor

4.1.2 Cenário 2: 50%

No Cenário 2, é feita a recarga de metade dos VEs, tais resultados estão divididos da mesma forma que o cenário anterior, de acordo com o seu tipo de carregamento.

4.1.2.1 Carregamento Descoordenado

Figura 4.3 – Curva de carga para o carregamento descoordenado com 50% dos VEs



Fonte: Autor

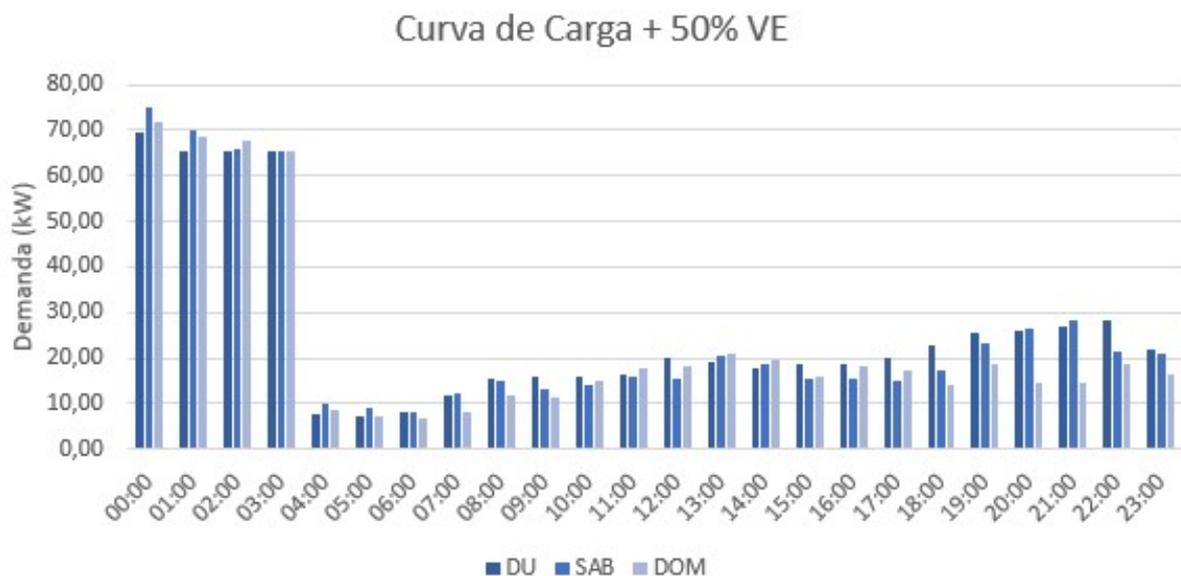
Tabela 4.3 – Resultados do Carregamento coordenado para 50% dos VEs conectados

Resultados			
Tipo de carregamento		Descoordenado (18:00 às 21:59)	
Número de VEs conectados		50%	
Pico de Carga	(s/VE)	28,31 kW	
	(c/VE)	84,64 kW	
Aumento de carga		199%	
Consumo	(s/VE)	11.822,47 kWh	
	(c/VE)	18570,87 kWh	
Tarifa		Convencional	Branca
	(s/VE)	R\$ 6.465,20	R\$ 8.214,13
	(c/VE)	R\$ 10.164,21	R\$ 14.764,37

Fonte: Autor

4.1.2.2 Carregamento Coordenado

Figura 4.4 – Curva de carga para o carregamento coordenado com 50% dos VEs



Fonte: Autor

Tabela 4.4 – Resultados do Carregamento coordenado para 50% dos VEs conectados

Resultados			
Tipo de carregamento	Coordenado (00:00 às 03:59)		
Número de VEs conectados	50%		
Pico de Carga	(s/VE)	28,31 kW	
	(c/VE)	75,23 kW	
Aumento de carga	166%		
Consumo	(s/VE)	11.822,47 kWh	
	(c/VE)	18570,87 kWh	
Tarifa		Convencional	Branca
	(s/VE)	R\$ 6.465,20	R\$ 8.214,13
	(c/VE)	R\$ 10.164,21	R\$ 12.236,73

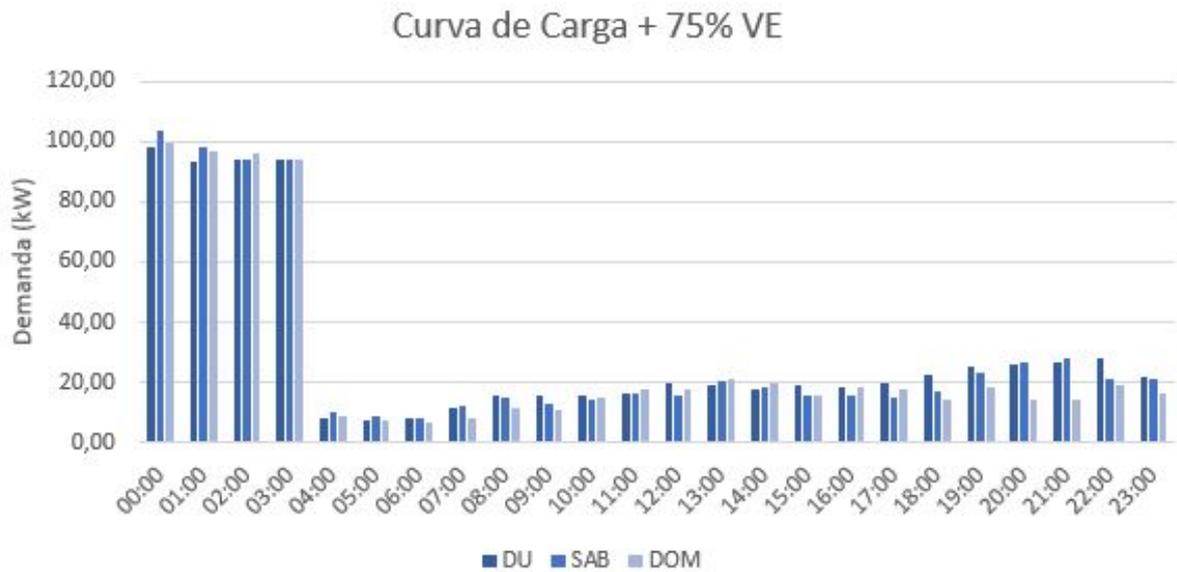
Fonte: Autor

4.1.3 Cenário 3: 75%

O Cenário 3 apresenta os resultados obtidos da mesma forma que os cenários anteriores, porém, com 75% dos VEs realizando a recarga.

4.1.3.1 Carregamento Descoordenado

Figura 4.5 – Curva de carga para o carregamento descoordenado com 75% dos VEs



Fonte: Autor

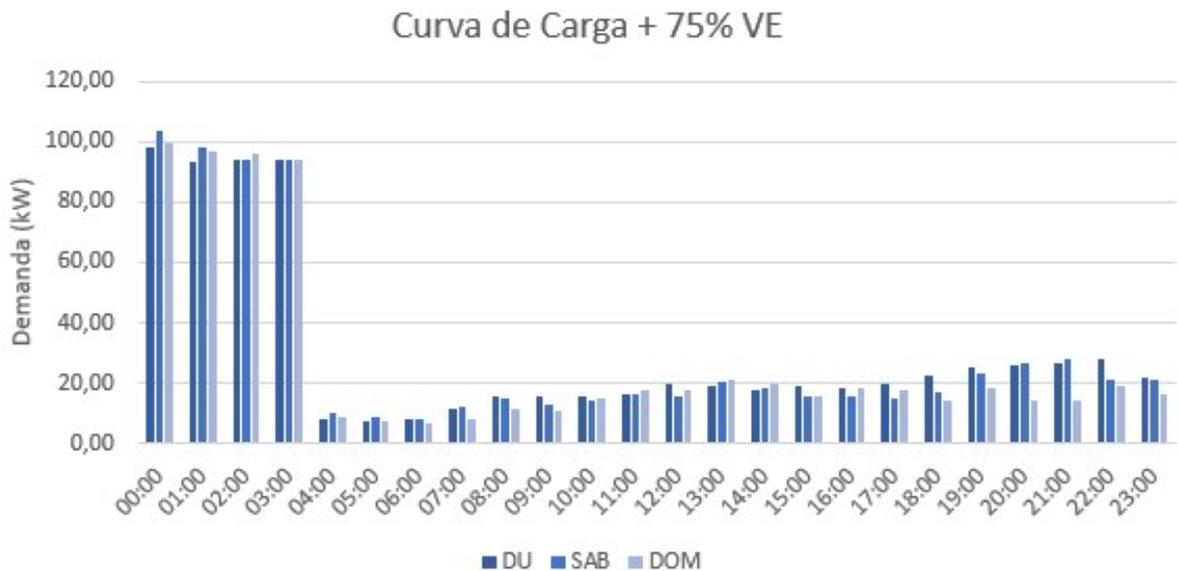
Tabela 4.5 – Resultados do Carregamento descoordenado para 75% dos VEs conectados

Resultados			
Tipo de carregamento		Descoordenado (18:00 às 21:59)	
Número de VEs conectados		75%	
Pico de Carga	(s/VE)	28,31 kW	
	(c/VE)	112,80 kW	
Aumento de carga		298%	
Consumo	(s/VE)	11.822,47 kWh	
	(c/VE)	21950,07 kWh	
Tarifa		Convencional	Branca
	(s/VE)	R\$ 6.465,20	R\$ 8.214,13
	(c/VE)	R\$ 12.013,71	R\$ 18.039,49

Fonte: Autor

4.1.3.2 Carregamento Coordenado

Figura 4.6 – Curva de carga para o carregamento coordenado com 75% dos VEs



Fonte: Autor

Tabela 4.6 – Resultados do Carregamento coordenado para 75% dos VEs conectados

Resultados			
Tipo de carregamento	Coordenado (00:00 às 03:59)		
Número de VEs conectados	75%		
Pico de Carga	(s/VE)	28,31 kW	
	(c/VE)	103,39 kW	
Aumento de carga	265%		
Consumo	(s/VE)	11.822,47 kWh	
	(c/VE)	21950,07 kWh	
Tarifa		Convencional	Branca
	(s/VE)	R\$ 6.465,20	R\$ 8.214,13
	(c/VE)	R\$ 12.013,71	R\$ 14.248,03

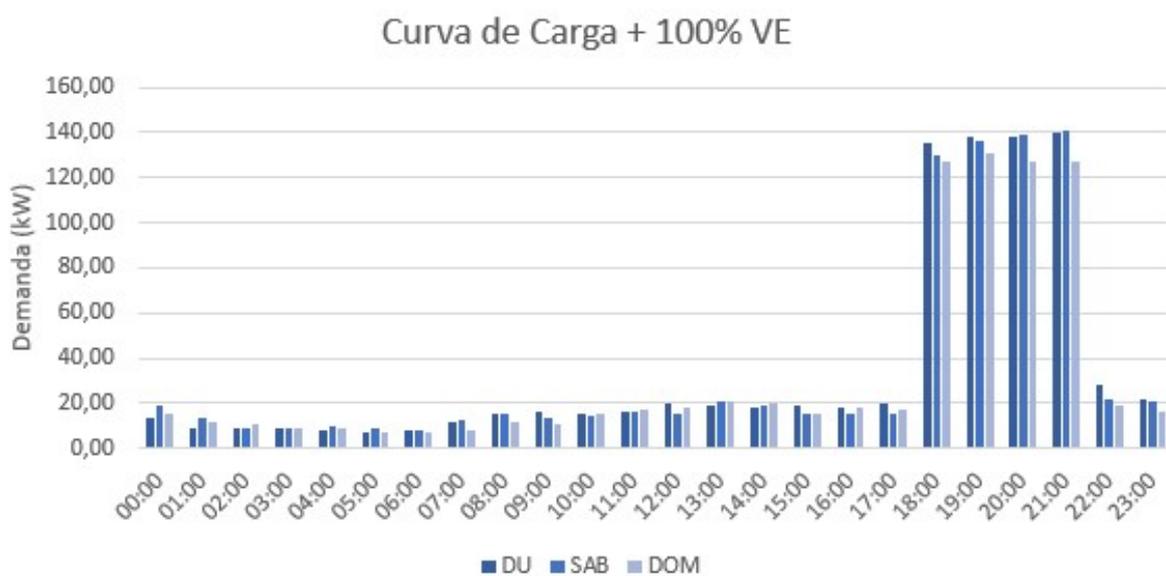
Fonte: Autor

4.1.4 Cenário 4: 100%

Por fim, no Cenário 4 pode-se observar o que acontece quando 100% do VEs estão conectados.

4.1.4.1 Carregamento Descoordenado

Figura 4.7 – Curva de carga para o carregamento descoordenado com 100% dos VEs



Fonte: Autor

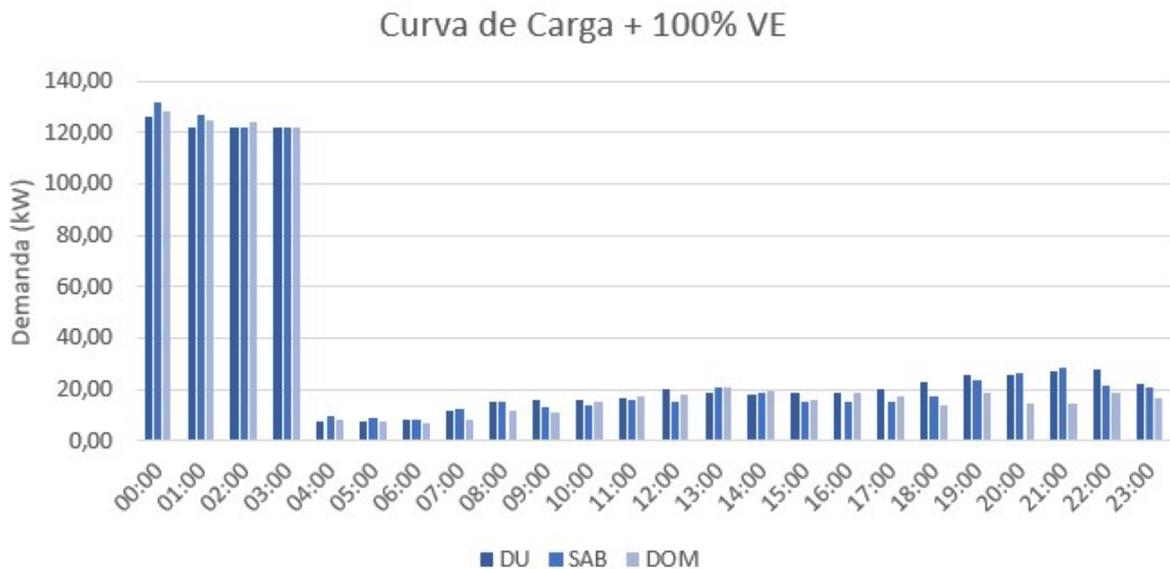
Tabela 4.7 – Resultados do Carregamento descoordenado para 100% dos VEs conectados

Resultados			
Tipo de carregamento	Descoordenado (18:00 às 21:59)		
Número de VEs conectados	100%		
Pico de Carga	(s/VE)	28,31 kW	
	(c/VE)	140,95 kW	
Aumento de carga	398%		
Consumo	(s/VE)	11.822,47 kWh	
	(c/VE)	25.329,27 kWh	
Tarifa		Convencional	Branca
	(s/VE)	R\$ 6.465,20	R\$ 8.214,13
	(c/VE)	R\$ 13.863,22	R\$ 21.314,61

Fonte: Autor

4.1.4.2 Carregamento Coordenado

Figura 4.8 – Curva de carga para o carregamento coordenado com 100% dos VEs



Fonte: Autor

Tabela 4.8 – Resultados do Carregamento coordenado para 100% dos VEs conectados

Resultados			
Tipo de carregamento		Coordenado (00:00 às 03:59)	
Número de VEs conectados		100%	
Pico de Carga	(s/VE)	28,31 kW	
	(c/VE)	131,55 kW	
Aumento de carga		364%	
Consumo	(s/VE)	11.822,47 kWh	
	(c/VE)	25.329,27 kWh	
Tarifa		Convencional	Branca
	(s/VE)	R\$ 6.465,20	R\$ 8.214,13
	(c/VE)	R\$ 13.863,22	R\$ 16.259,33

Fonte: Autor

4.1.5 Resultados

Nessa seção será apresentado um comparativo dos resultados obtidos nas simulações, bem como a discussão sobre o que cada um deles representa.

As Tabelas 4.9 e 4.10 trazem um compilado dos resultados encontrados para os quatro cenários analisados. A partir das tabelas mencionadas, pode-se observar a variação do número de VEs conectados à rede durante o carregamento coordenado e descoordenado, o aumento de carga e os valores das tarifas convencional e branca aplicados a esse conjunto residencial.

Tabela 4.9 – Comparativo de resultados para 25% e 50% dos VEs

Resultados				
Número de VEs	25%		50%	
Tipo de Carregamento	Desc.	Coord.	Desc.	Coord.
Tarifa Convencional	R\$ 8.314,71	R\$ 8.314,71	R\$ 10.164,21	R\$ 10.164,21
Tarifa Branca	R\$ 11.489,25	R\$ 10.225,43	R\$ 14.764,37	R\$ 12.236,73
Acréscimo	R\$ 3.174,55	R\$ 1.910,72	R\$ 4.600,16	R\$ 2.072,52
Aumento de Carga	99%	66%	199%	166%

Fonte: Autor

Tabela 4.10 – Comparativo de resultados para 75% e 100% dos VEs

Resultados				
Número de VEs	75%		100%	
Tipo de Carregamento	Desc.	Coord.	Desc.	Coord.
Tarifa Convencional	R\$ 12.013,71	R\$ 12.013,71	R\$ 13.863,22	R\$ 13.863,22
Tarifa Branca	R\$ 18.039,49	R\$ 14.248,03	R\$ 21.314,61	R\$ 16.259,33
Acréscimo	R\$ 6.025,78	R\$ 2.234,32	R\$ 7.451,40	R\$ 2.396,11
Aumento de Carga	298%	265%	398%	365%

Fonte: Autor

Ao analisar os resultados obtidos, pode-se observar um aumento de carga expressivo e diretamente ligado ao número de veículos conectados à rede, passando de 99%, com 25% dos VEs conectados, para 398%, com 100% dos VEs conectados, quando utilizado o carregamento descoordenado. Um aumento de mesma proporção pode ser observado quando analisado o carregamento coordenado, indo de 66%, com 25% dos VEs conectados, para 365%, com 100% dos VEs inseridos à rede. Além disso, é notável uma redução de 33% no aumento de carga, para todos os casos avaliados, ao utilizar o carregamento coordenado, em relação a sua alternativa descoordenada. Porém, em todos os casos a tarifa branca falha em ser inferior a tarifa convencional. Todavia, tal resultado é diretamente ligado ao perfil de consumo das unidades consumidoras, onde apenas o carregamento dos VEs fora do horário de pico, se provou insuficiente para justificar uma possível redução no valor na conta de energia elétrica.

4.1.6 Cenário Ideal

Em um cenário ideal, com objetivo de reduzir o a sobrecarga observada nos casos anteriores, foi definida a utilização de ambas as forma de carregamento (coordenado e descoordenado) e aproveitou-se da afirmação mencionada anteriormente, feita por Shafiee et al.(2013) que fala da necessidade de realizar a recarga dos VEs apenas a cada dois dias quando utilizados diariamente. Portanto, a recarga foi feita de forma parcial e, além disso, apenas metade das unidades consumidoras foi considerada realizando o carregamento de seus VEs durante o dia.

Tomando isso como base para realizar essa análise, obteve-se a curva de carga apresentada na Figura 4.9 e os resultados na Tabela 4.11.

Figura 4.9 – Curva de carga para o carregamento coordenado e descoordenado, ambos com 25% dos VEs



Fonte: Autor

Tabela 4.11 – Resultados obtidos pelo Cenário Ideal

Resultados	
Número de VEs	25% - 25%
Tipo de Carregamento	Desc. + Coord.
Tarifa Convencional	R\$ 10.164,21
Tarifa Branca	R\$ 13.500,55
Acréscimo	R\$ 3.336,34
Aumento de Carga	99%

Fonte: Autor

Nesse caso, se destaca o aumento de carga, inferior aos outros casos observados na seção anterior. Porém, também não é atrativo de um ponto de vista econômico. A partir disso, no Apêndice B são demonstrados outros cenários semelhantes ao recém descrito, no qual é feito um balanceamento do número de veículos elétricos ao longo do dia buscando atingir melhores resultados, porém, tais cenários compartilham dos mesmos problemas referentes ao aumento de carga excessivo e tarifação inviável.

Como resultado, pode-se concluir que o método de carregamento coordenado é, mesmo que de forma discreta, capaz de reduzir o aumento de carga causado pela conexão desses veículos elétricos. Todavia, conclui-se que o método foi incapaz de reduzir o valor

da tarifa para todos os casos, tornando assim, injustificável o uso da tarifa branca por parte do consumidor, o que acaba invalidando o uso dessa forma de carregamento coordenado, conhecida como *valley fill charging*, quando aplicada ao estudo de caso feito nesse trabalho.

5 CONCLUSÃO

A inserção de veículos elétricos constitui uma possível solução para a mobilidade urbana que assegura o deslocamento com impactos reduzidos ao meio ambiente (BORBA, 2012). Entretanto, um aspecto negativo e relevante associado ao uso de eletricidade pelo setor de transportes, está relacionado ao aumento da demanda elétrica e a possível necessidade de aumento da capacidade de geração de energia elétrica. Mais do que isso, a penetração dos veículos elétricos no sistema elétrico pode ocasionar sobrecarga em transformadores e linhas de distribuição e, principalmente, dependendo do momento e forma da recarga, prejudicar o sistema elétrico.

Por meio desse trabalho, construiu-se uma metodologia capaz de analisar o carregamento de veículos elétricos durante dois períodos do dia. Esse procedimento possibilitou a definição e aplicação de parâmetros de carregamento em um conjunto residencial, para que fosse possível observar o aumento de carga causado pela penetração de veículos elétricos. Como solução, buscou-se utilizar um método de carregamento coordenado conhecido como *valley fill charging*, que, como o nome sugere, remete ao carregamento onde a curva de carga se encontra em vale, ou seja, fora de horários de pico. Para viabilizar o uso desse carregamento e incentivar as unidades consumidoras a realizar a recarga de seus veículos nesse período, considerado no desenvolvimento do trabalho, como coordenado, utilizou-se da nova modalidade tarifária desenvolvida pela ANEEL, conhecida como tarifa branca. Essa tarifa reduz o custo de energia elétrica em períodos fora de pico e, de forma análoga, aumenta o custo em períodos de pico. Sendo assim, considerou-se que o uso dessa tarifa, aliado ao carregamento coordenado seria uma alternativa, no qual deveria ser investigada para evitar sobrecargas no sistema, caso houvesse um apelo econômico às unidades consumidoras.

Quanto ao tópico em questão, fora mencionado em diversas oportunidades, como uma modalidade tarifária que fosse dinâmica aliada ao carregamento fora de horários de pico, poderia ser uma alternativa para evitar sobrecargas e reduzir gastos referentes ao consumo de energia elétrica. Porém, ao analisar os valores das contas de energia elétrica obtidas, foi possível observar que ao utilizar a tarifa branca há um acréscimo nos custos em relação a tarifa convencional para todos os casos abordados. Mais ainda, não só a tarifa branca se prova ineficiente em reduzir os gastos na conta de luz, ela promove uma redução no aumento de carga de apenas 33% em relação ao carregamento em horários de pico. Todavia, essa estratégia não deve ser completamente descartada, uma vez que, dependendo do perfil de consumo de outras unidades consumidoras, há uma possibilidade de tornar esses resultados pouco promissores em uma solução para o sobrecarga do sistema.

Por fim, cabe a análise de outras metodologias para evitar a sobrecarga do sistema, como a utilização de baterias externas para armazenar energia em períodos de baixa demanda e descarregar essa energia armazenada, apenas em períodos de pico. No entanto,

atualmente, o preço de baterias impossibilita o uso dessa alternativa, que pode se tornar viável a partir do desenvolvimento e otimização de novas tecnologias relacionadas, tornando a utilização de baterias para redução na demanda, em períodos de pico, uma alternativa cada vez mais atrativa.

5.1 TRABALHOS FUTUROS

Para garantir que a conexão dos VEs à rede não seja tão impactante como observado, cabe a realização de estudos abrangendo outros métodos de carregamento e novas tecnologias. Além disso, viabilizar o uso de um fluxo bidirecional de potência entre as baterias e a rede, tornaria os VEs em uma solução para diversos problemas atuais relacionados ao sistema elétrico. Sendo assim, a análise realizada nesse trabalho pode ser expandida através de trabalhos futuros, como:

- Análise dos Impactos Técnicos causados pela conexão de VEs;
- Viabilizar o uso da tecnologia V2G (fluxo bidirecional);
- Prever o aumento do número de VEs conectados à rede utilizando métodos estatísticos;
- Utilizar outras formas de carregamento coordenado para evitar sobrecargas na rede.

REFERÊNCIAS

- ABB. **EVLunic basic - AC-Wallbox**. [S.l.], 2019. Disponível em: <<https://new.abb.com/ev-charging/products/car-charging/ac-wallbox/evlunic-basic>>.
- ABUL'WAFI, A. R.; EL'GARABLY, A.; MOHAMED, W. F. Uncoordinated vs coordinated charging of electric vehicles in distribution systems performance. v. 1, p. 54–65, Ago 2017.
- ALSHAMLI, Y. et al. A review of concepts in power system stability. n. 1-4, February 2015.
- ANDERSON, C. D.; ANDERSON, J. **Electric and Hybrid Cars: A History**. [S.l.]: McFarland & Company, Inc., 2010.
- ANEEL. **A Tarifa de Energia Eletrica**. [S.l.], 2016. Disponível em: <<https://www.aneel.gov.br/tarifas>>.
- _____. **Estrutura tarifária DEMEI**. [S.l.], 2017. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/audiencia/arquivo/2017/012/documento/estrutura_tarifaria_demei_ap_12-2017.pdf>.
- _____. **Tarifa Branca**. [S.l.], 2019. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/tarifa-branca>>.
- BARAN, R.; LEGEY, L. F. L. Veículos elétricos: historia e perspectivas no brasil. v. 33, p. 207–224, 2011.
- BARASSA, E. **Trajectoria tecnológica do veículo elétrico: atores, políticas e esforços tecnológicos no Brasil**. 2015.
- BARROS, B. F.; BORELI, R.; GEDRA, R. L. **Geração, Transmissão, Distribuição e Consumo de Energia Elétrica**. [S.l.]: Erica, 2014.
- BORBA, B. S. M. C. **Modelagem integrada da Introdução de Veiculos Leves Conectaveis à Rede Eletrica no sistema Energetico Brasileiro**. 2012.
- CNN. **These countries want to ditch gas and diesel cars**. [S.l.], 2017. Disponível em: <<https://money.cnn.com/2017/07/26/autos/countries-that-are-banning-gas-cars-for-electric/index.html?iid=EL>>.
- COPEL, D. Avaliação da vida Útil dos transformadores da copel distribuição. 2004.
- DIJK, M.; YARIME, M. The mergece of hybrid-electric cars: Innovation path creation through coevolution of supply and demand.
- ENERGY, U. D. of. **Alternative Fuels Data Center: How Do All-Electric Cars Work?** [S.l.], 2019. Disponível em: <<https://afdc.energy.gov/vehicles/how-do-all-electric-cars-work>>.

GIULIANI, E. **ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA NA PROTEÇÃO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**. 2018.

GUARDA, F. G. K. **ALOCAÇÃO E DIMENSIONAMENTO DE LIMITADORES DE CORRENTE DE FALTA PARA MINIMIZAR A INFLUÊNCIA DE FONTES DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA NA PROTEÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS**. 2012.

INGALE, R. . Harmonic analysis using fft and stft. v. 7, n. 4, p. 345–362, 2014.

JENKINS, J. **A closer look at power factor correction**. [S.l.], 2018. Disponível em: <<https://chargedevs.com/features/a-closer-look-at-power-factor-correction/>>.

LARMINE, J.; LOWRY, J. **Electric Vehicles Technology Explained**. [S.l.]: West Sussex: John Wiley Sons, 2003.

LIU, R.; DOW, L.; LIU, E. A survey of pev impacts on electric utilities. In: **ISGT 2011**. [S.l.: s.n.], 2011. p. 1–8.

MARAH, B. et al. . Impact of electric vehicle charging systems on low voltage distribution networks. 2016.

MONIZ, O. V. **Perda de Vida Útil Técnica e Perda de Vida Útil Econômica dos Transformadores de Distribuição**. 2007.

MOREIRA, B. **Rede sobrecarregada**. [S.l.], 2016. Disponível em: <<https://www.osetoelettrico.com.br/rede-sobrecarregada/>>.

PUPPO, A. S. Analise de possibilidades para a introdução de veículos elétricos no trafego urbano da cidade de são paulo: Uma abordagem por meio da analise morfologica. v. 4, n. 2, p. 03–20, 2012.

RODRIGUES, M. et. al. Analise de possibilidades para a introdução de veículos elétricos no trafego urbano da cidade de são paulo: Uma abordagem por meio da analise morfologica. v. 4, n. 2, p. 03–20, 2014.

SALDANHA, J. J. A. **Gerenciamento Inteligente da Recarga de Veiculos Otimizando a Operação do Sistema Eletrico de Potência**. 2017.

SILVA, D. F. et al. Impact analysis of plug-in electric vehicle connected in real distribution network. v. 14, n. 5, p. 2239–2245, MAY 2016.

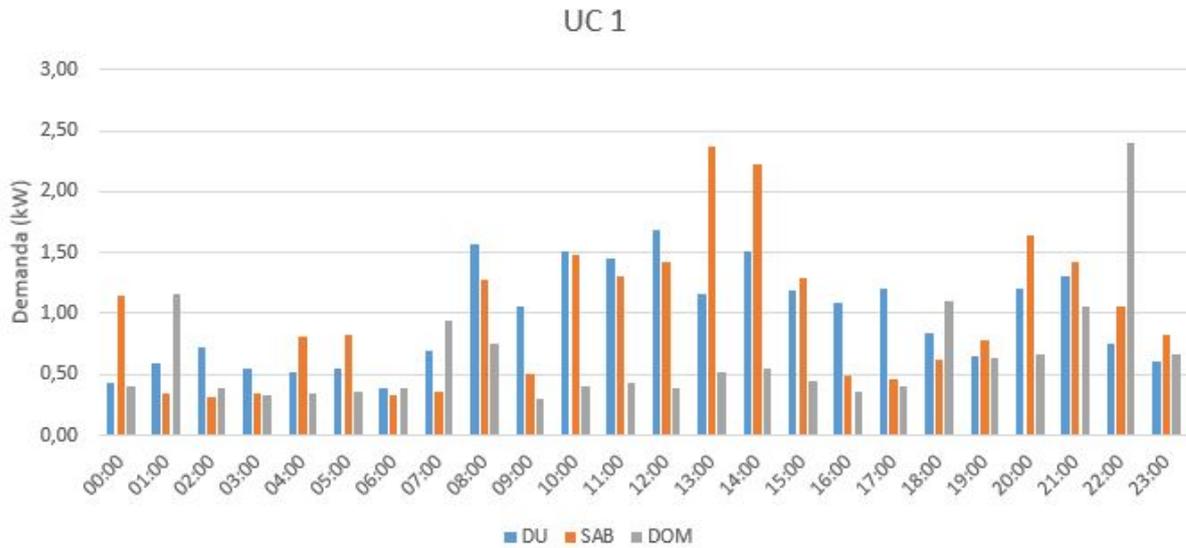
VOUMVOULAKIS, E. et al. Evaluation of the impact of plug-in electric vehicles in greek distribution network. 2017.

YILMAZ, M.; KREIN, P. T. Review of battery charger topologies, charging power levels, and infrastructre for plug-in electric and hybrid vehicles. v. 28, p. 2151–2169, Maio 2012.

APÊNDICES

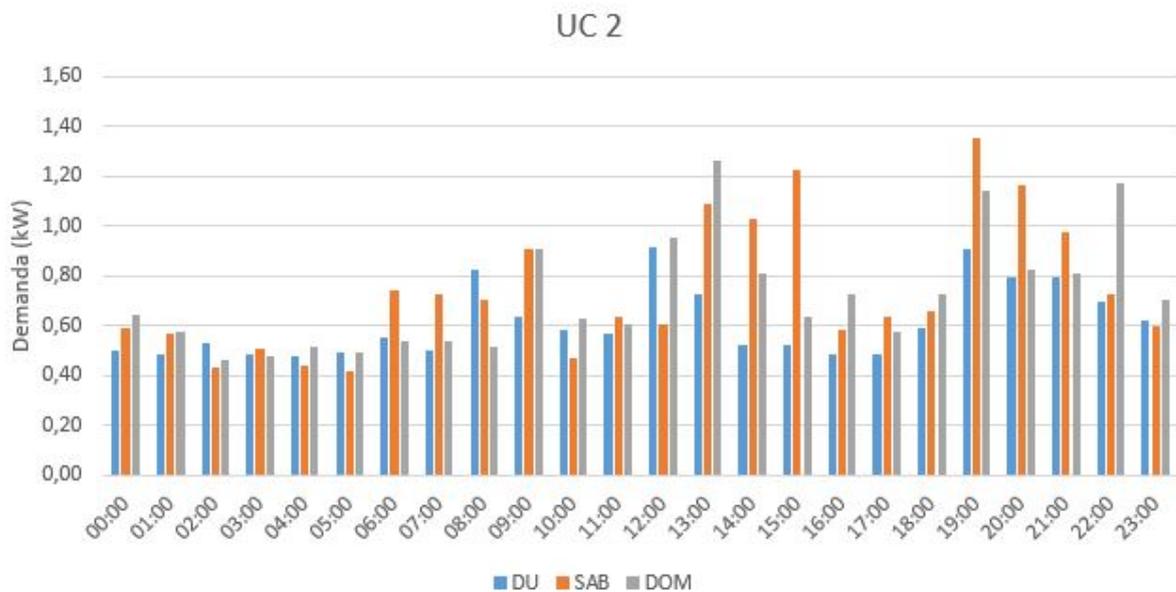
Apêndice A – Curvas de Carga das Unidades Consumidoras

Figura A.1 – Curva de carga UC 1



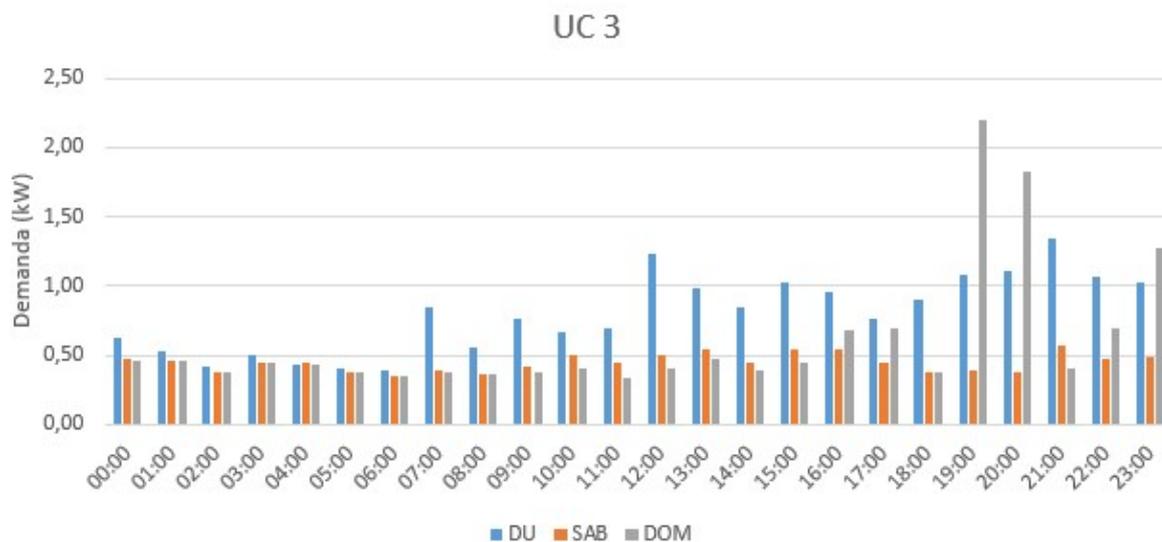
Fonte: Autor

Figura A.2 – Curva de carga UC 2



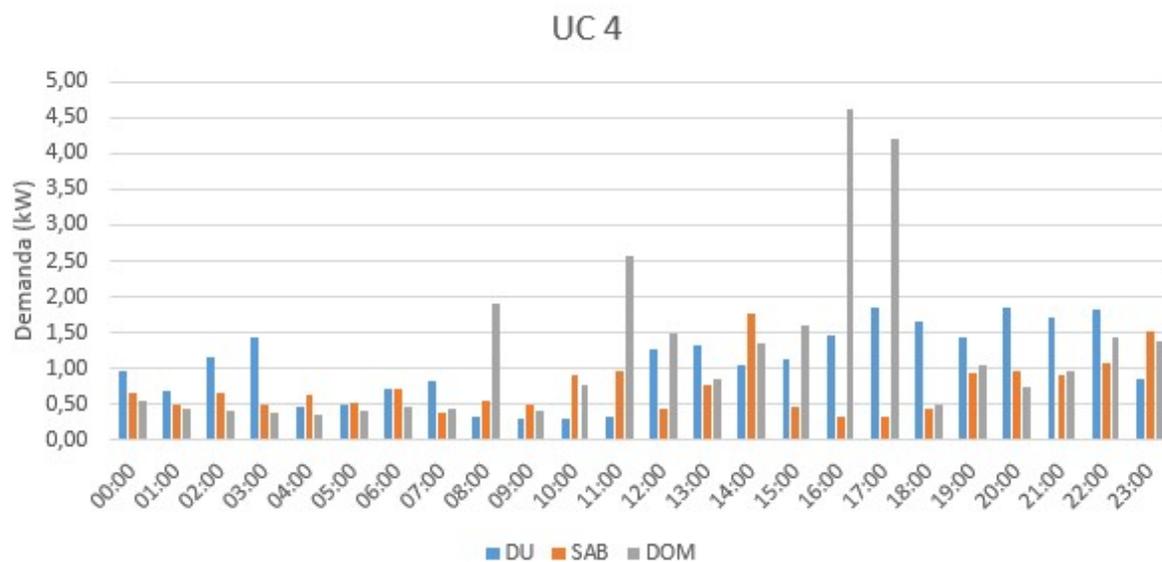
Fonte: Autor

Figura A.3 – Curva de carga UC 3



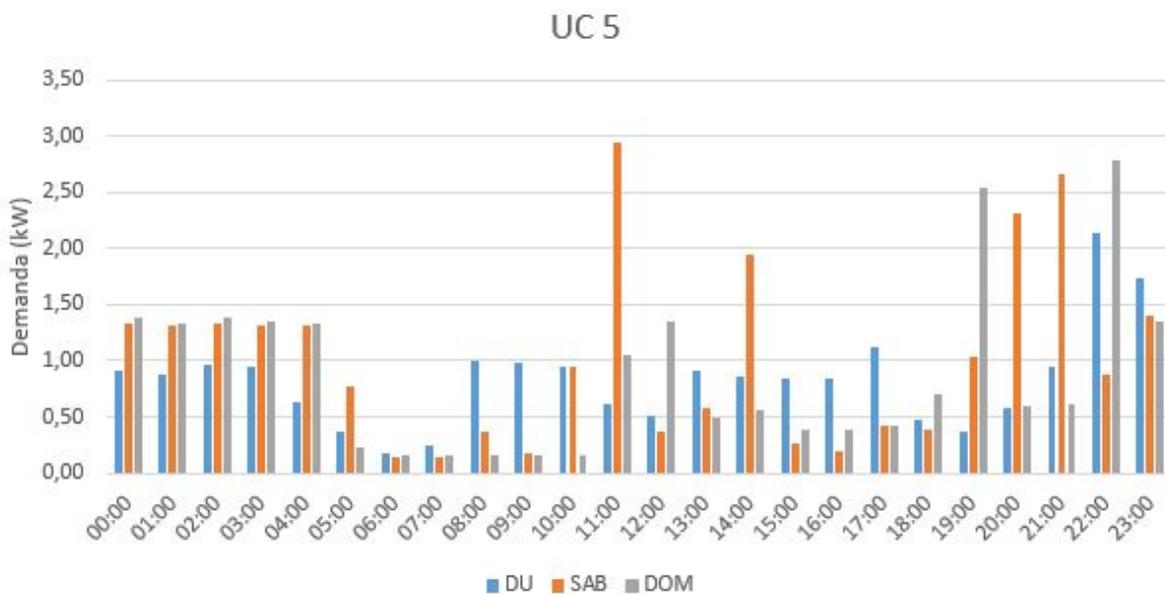
Fonte: Autor

Figura A.4 – Curva de carga UC 4



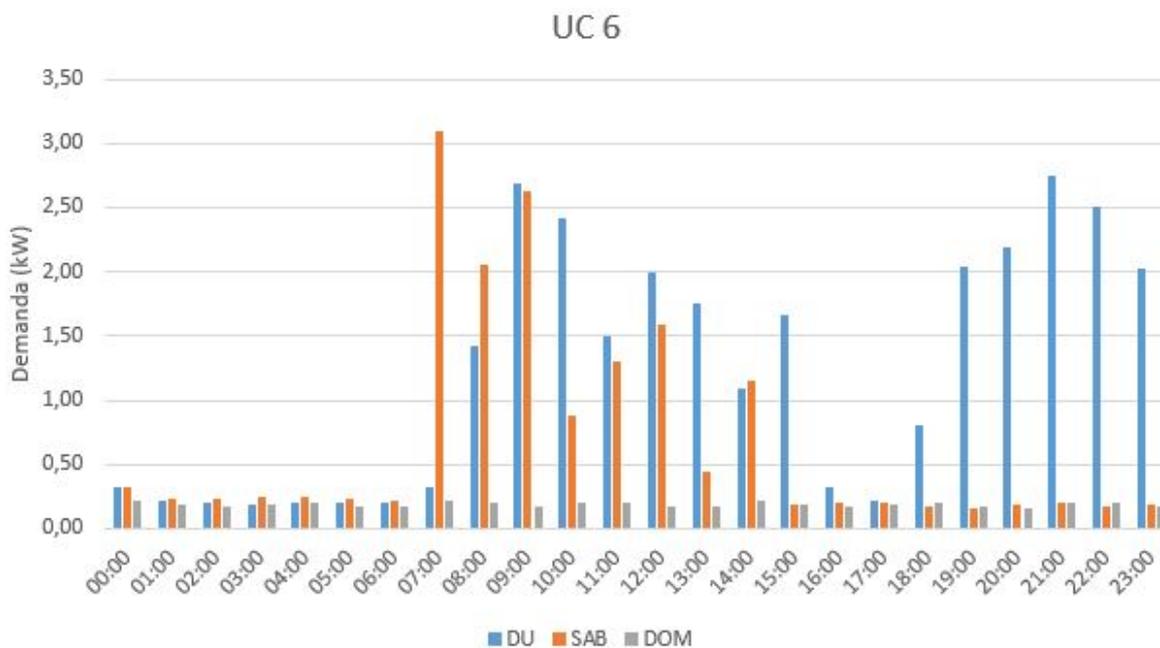
Fonte: Autor

Figura A.5 – Curva de carga UC 5



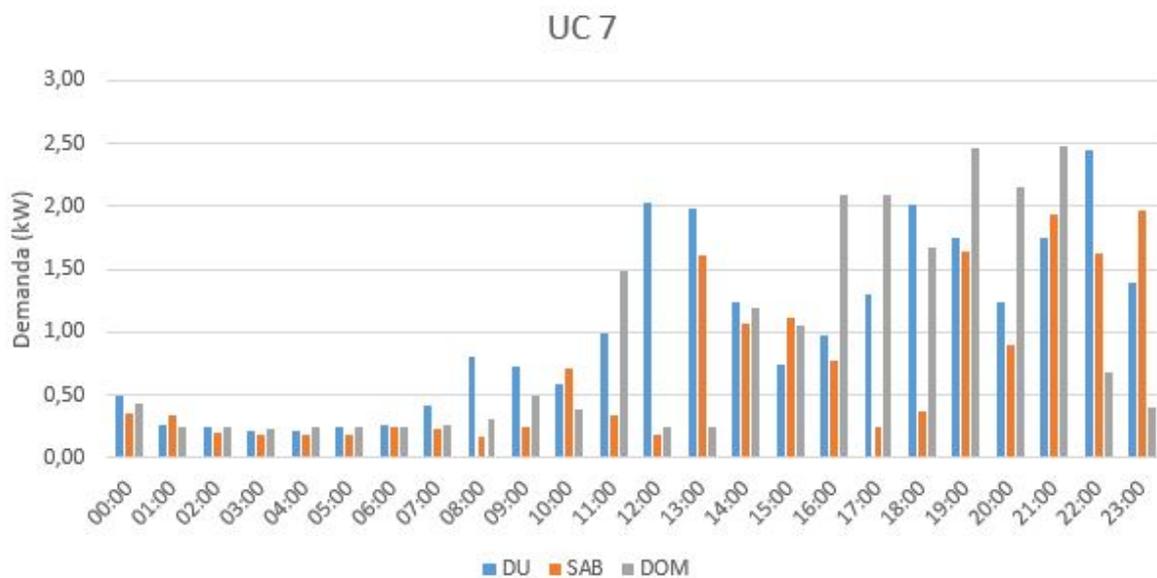
Fonte: Autor

Figura A.6 – Curva de carga UC 6



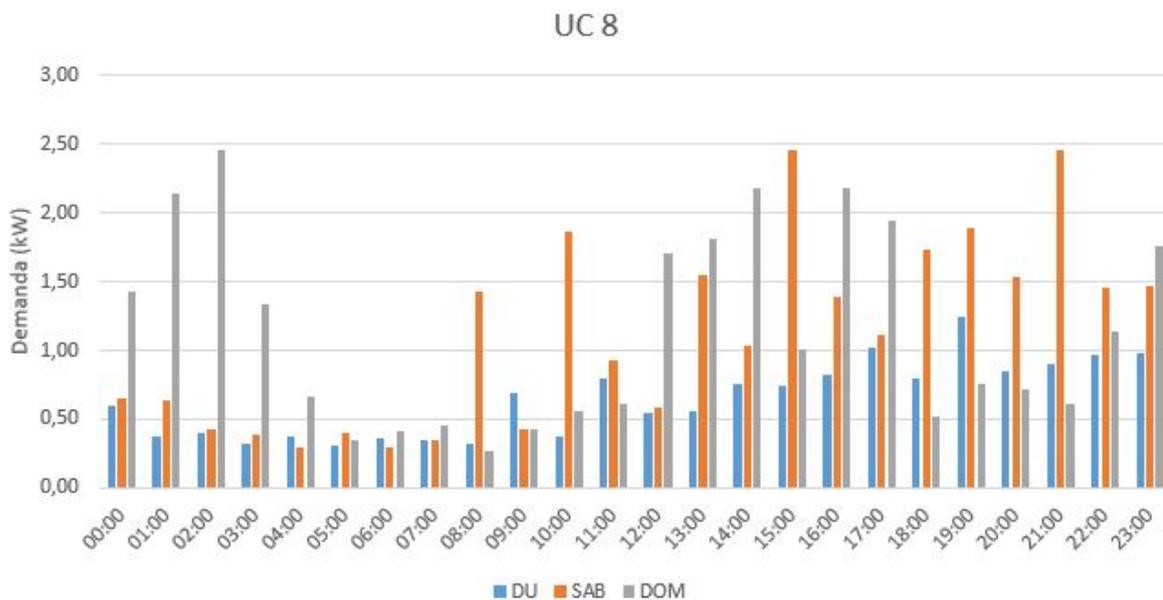
Fonte: Autor

Figura A.7 – Curva de carga UC 7



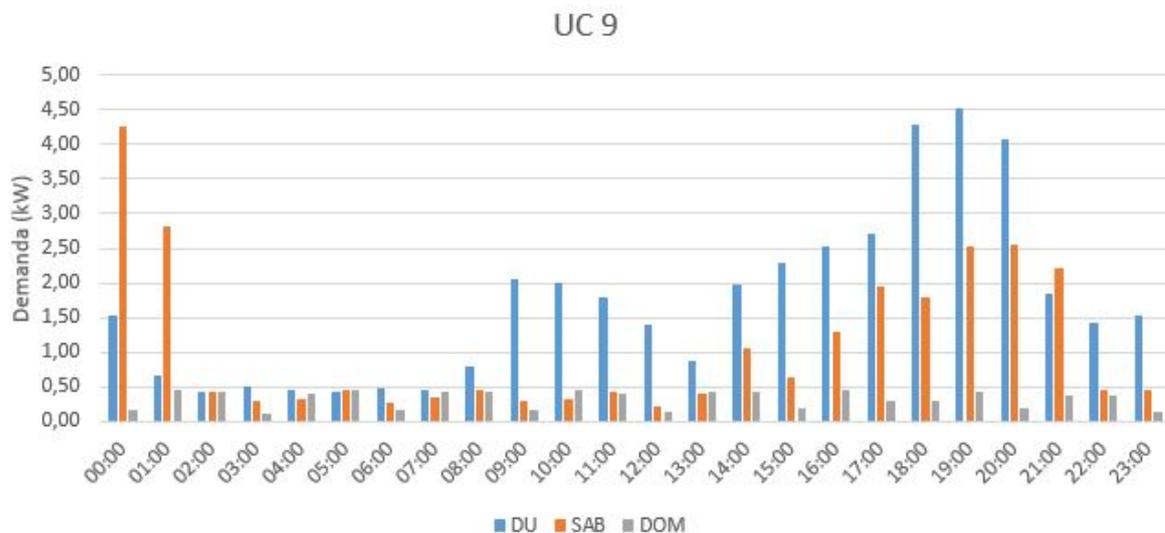
Fonte: Autor

Figura A.8 – Curva de carga UC 8



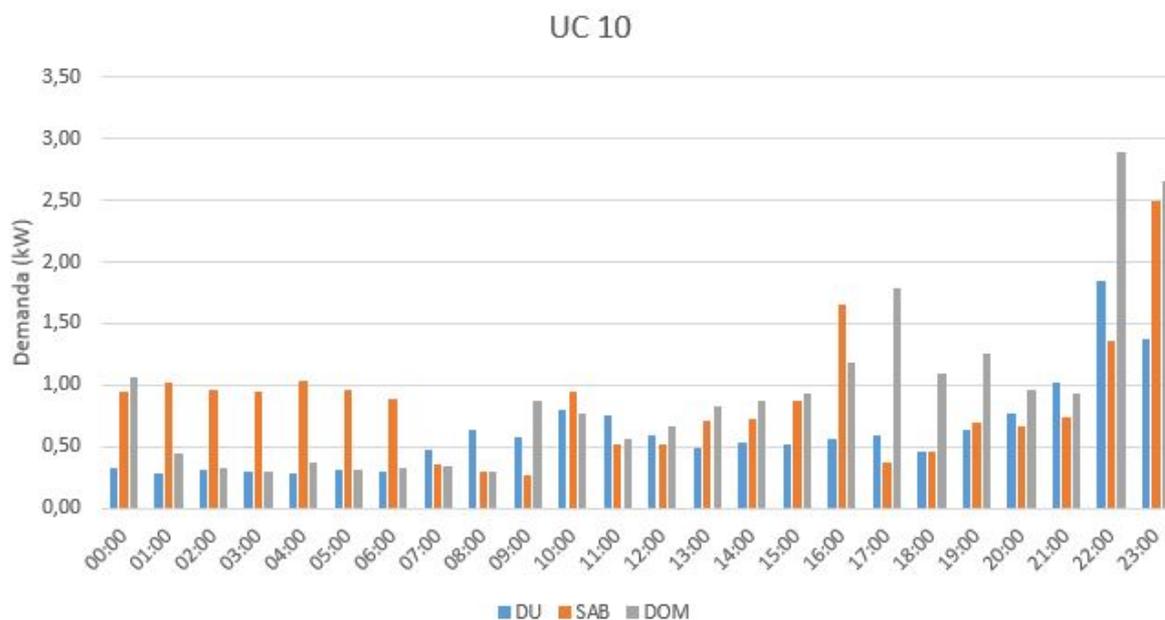
Fonte: Autor

Figura A.9 – Curva de carga UC 9



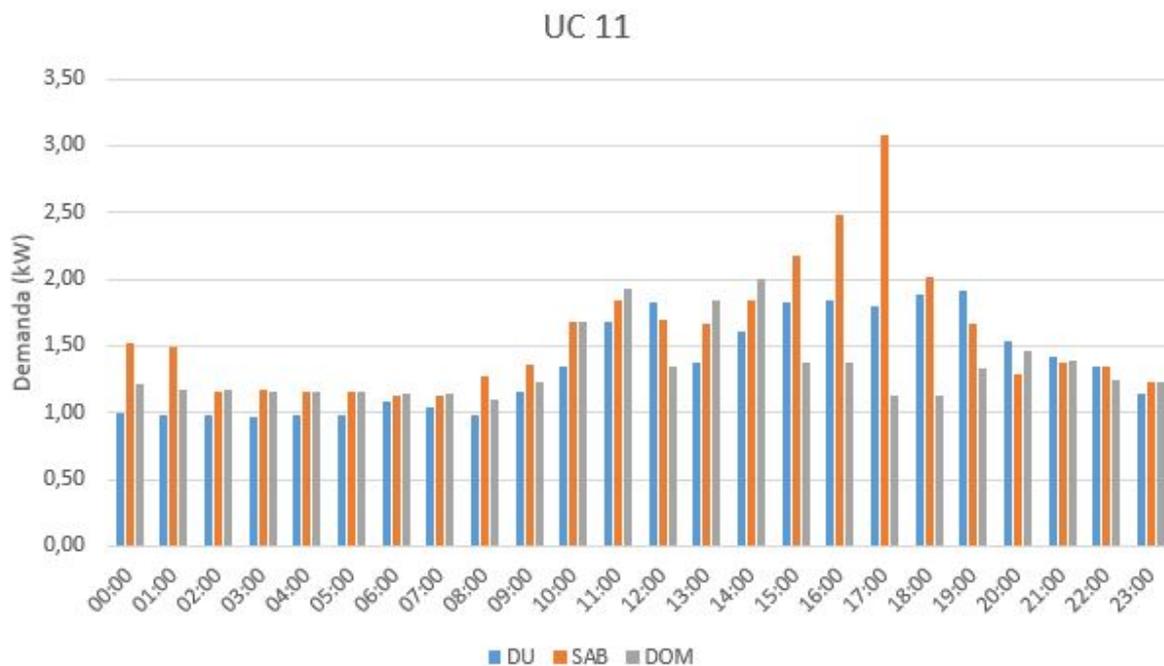
Fonte: Autor

Figura A.10 – Curva de carga UC 10



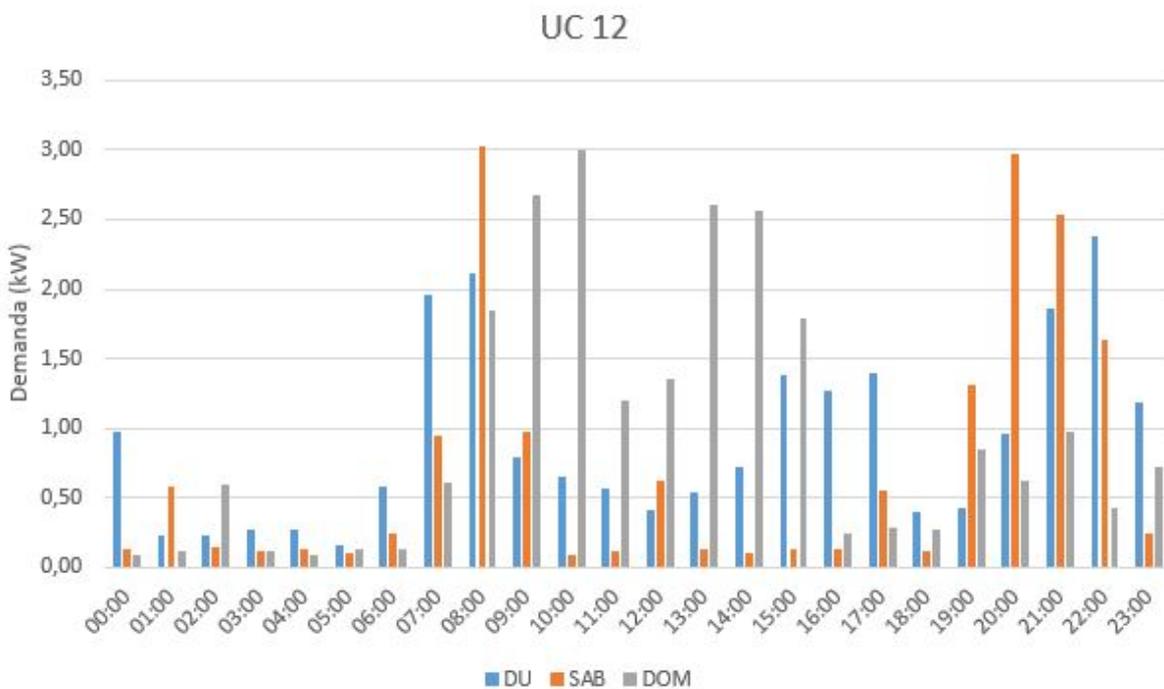
Fonte: Autor

Figura A.11 – Curva de carga UC 11



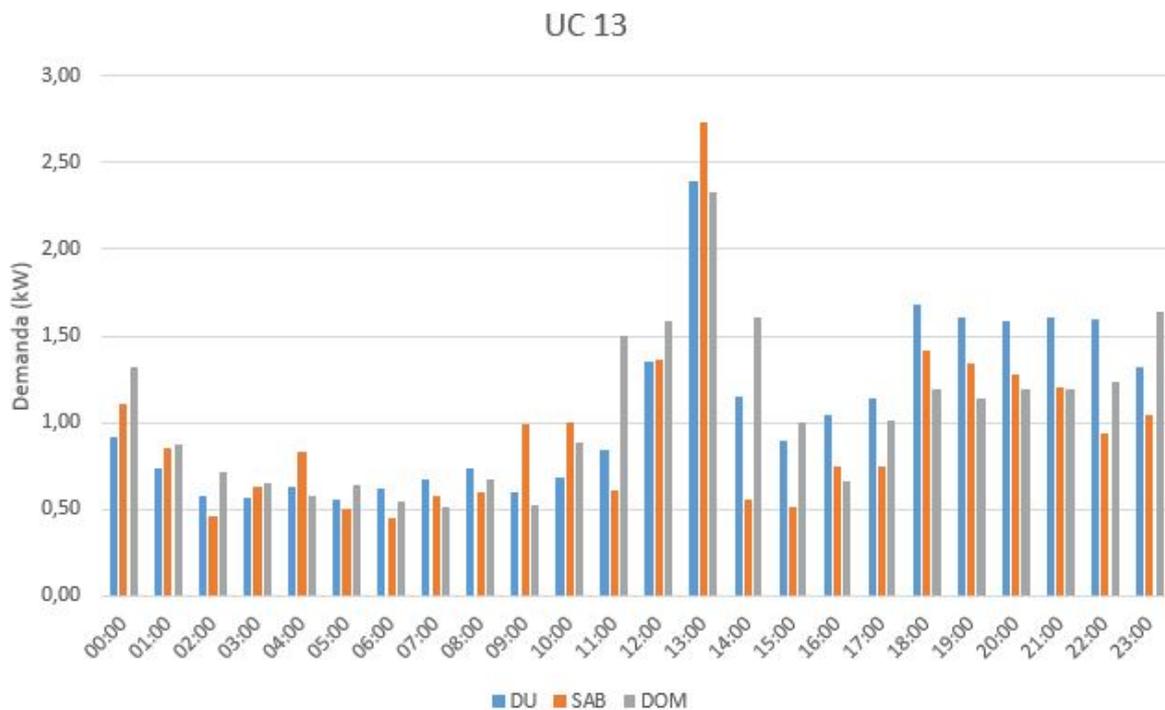
Fonte: Autor

Figura A.12 – Curva de carga UC 12



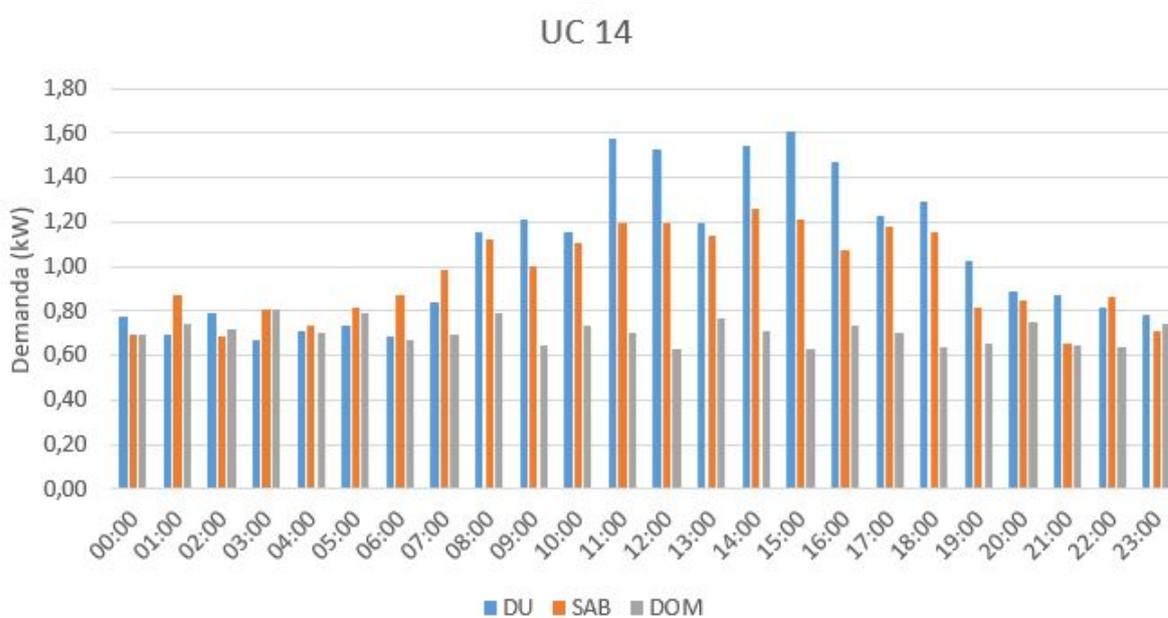
Fonte: Autor

Figura A.13 – Curva de carga UC 13



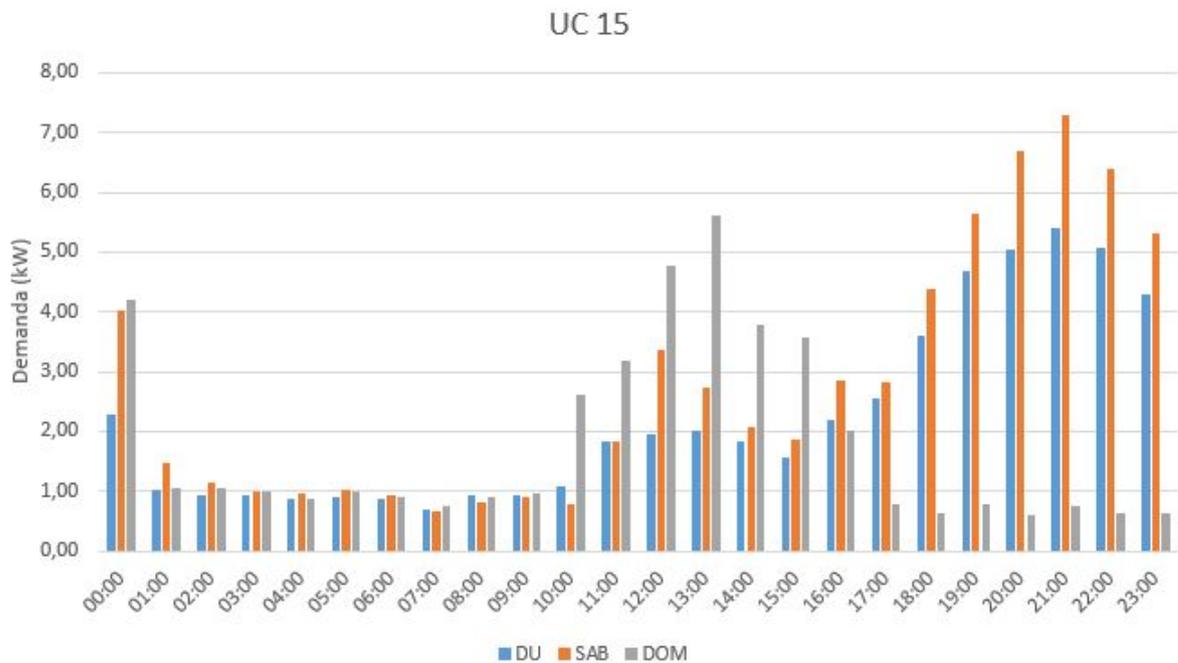
Fonte: Autor

Figura A.14 – Curva de carga UC 14



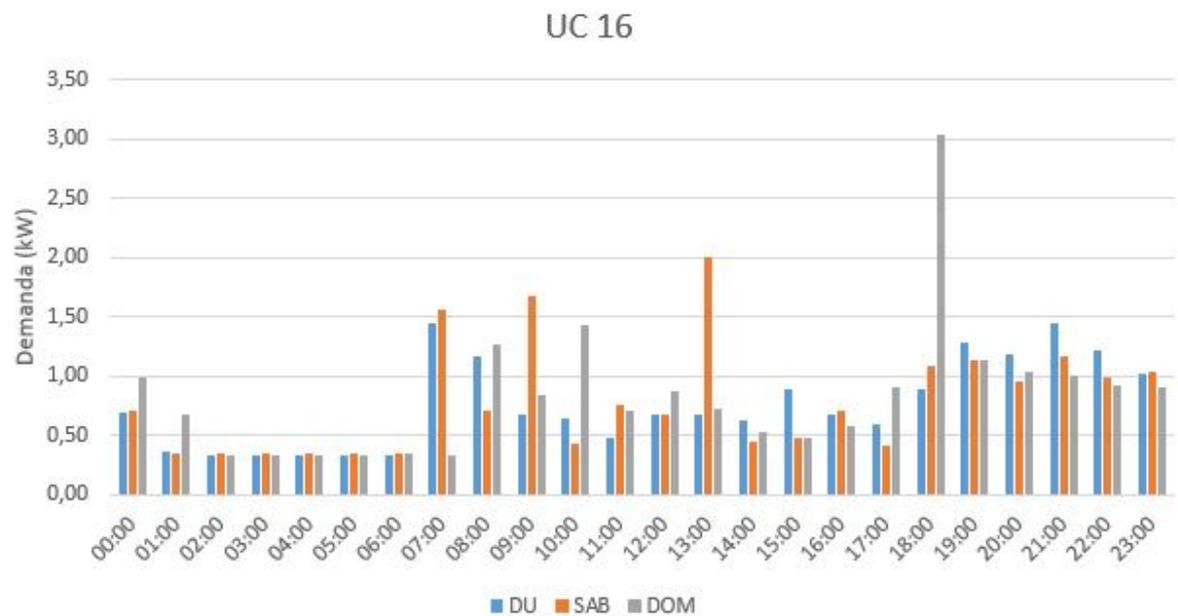
Fonte: Autor

Figura A.15 – Curva de carga UC 15



Fonte: Autor

Figura A.16 – Curva de carga UC 16



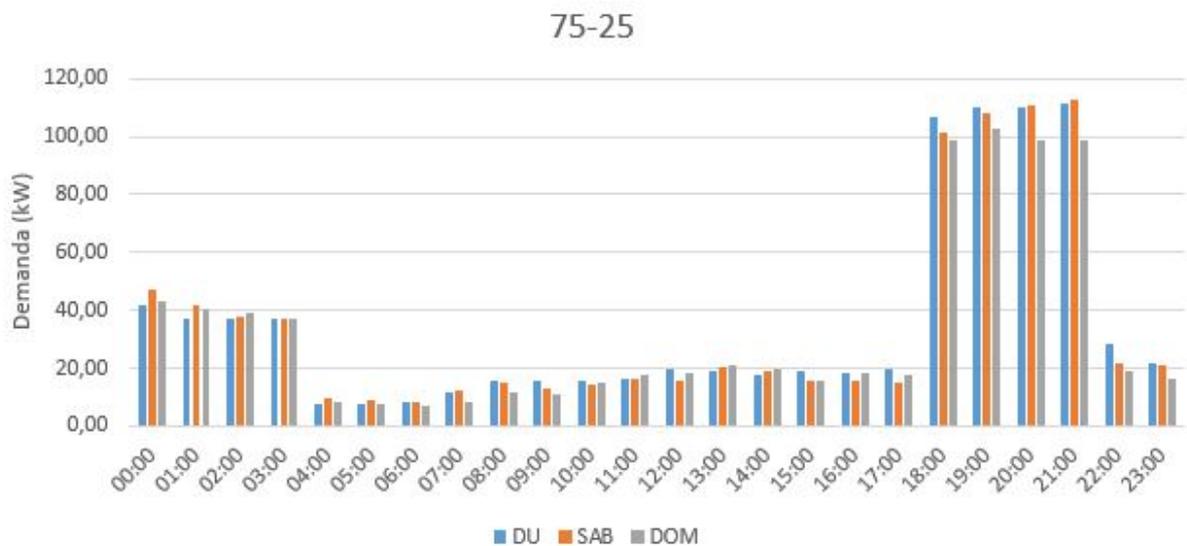
Fonte: Autor

Apêndice B – Casos Especiais

Nesse apêndice está disposto a curva de carga e os resultados de alguns casos especiais. Esses casos são similares ao escolhido no final do estudo de caso, porém, representam casos em que 100% dos VEs foram carregados durante o dia e foram feitos com o objetivo de observar seu comportamento.

B.1 DESC. 75% E COORD. 25%

Figura B.1 – Curva de carga para o carregamento coordenado e descoordenado, com 75% - 25%



Fonte: Autor

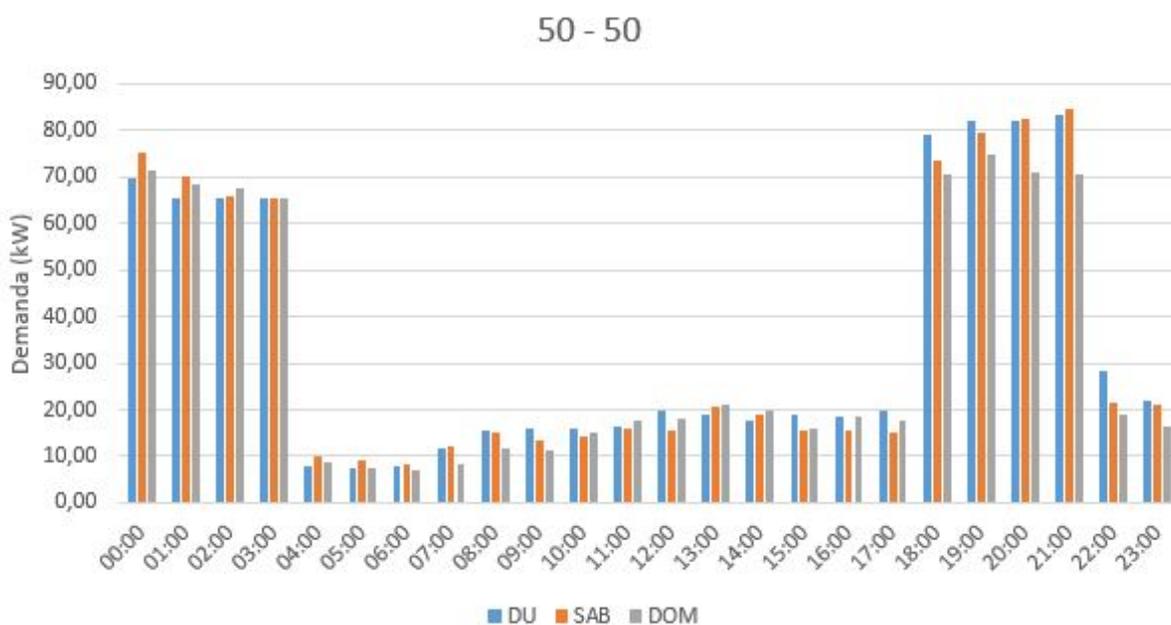
Tabela B.1 – Resultados obtidos 75%-25%

Resultados	
Número de VEs	75% - 25%
Tipo de Carregamento	Desc. + Coord.
Tarifa Convencional	R\$ 13.863,22
Tarifa Branca	R\$ 20.050,79
Acréscimo	R\$ 6.187,58
Aumento de Carga	298%

Fonte: Autor

B.2 DESC. 50% E COORD. 50%

Figura B.2 – Curva de carga para o carregamento coordenado e descoordenado, com 50% - 50%



Fonte: Autor

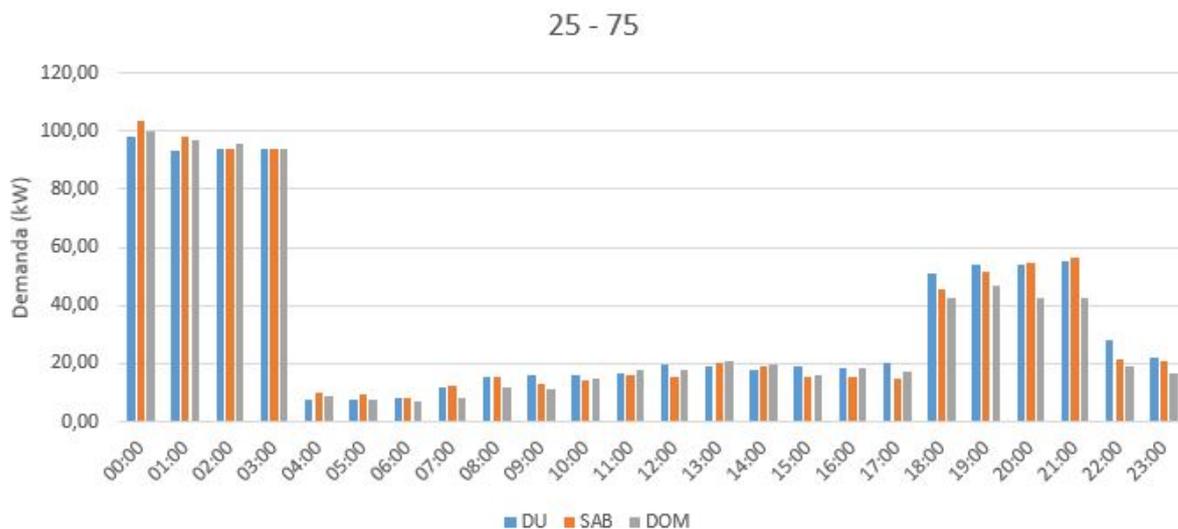
Tabela B.2 – Resultados obtidos 50%-50%

Resultados	
Número de VEs	50% - 50%
Tipo de Carregamento	Desc. + Coord.
Tarifa Convencional	R\$ 13.863,22
Tarifa Branca	R\$ 18.786,97
Acréscimo	R\$ 4.923,75
Aumento de Carga	199%

Fonte: Autor

B.3 DESC. 25% E COORD. 75%

Figura B.3 – Curva de carga para o carregamento coordenado e descoordenado, com 25% - 75%



Fonte: Autor

Tabela B.3 – Resultados obtidos 25%-75%

Resultados	
Número de VEs	25% - 75%
Tipo de Carregamento	Desc. + Coord.
Tarifa Convencional	R\$ 13.863,22
Tarifa Branca	R\$ 17.523,15
Acréscimo	R\$ 3.659,93
Aumento de Carga	265%

Fonte: Autor