

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica

**O VEÍCULO ELÉTRICO E O IMPACTO NA CURVA DE CARGA DE
CONSUMIDORES: ESTUDO DE CASO DO FIAT 500E**

Fernanda Cristina Martins Cortezzi

Belo Horizonte
2017

Fernanda Cristina Martins Cortezzi

**O VEÍCULO ELÉTRICO E O IMPACTO NA CURVA DE CARGA DE
CONSUMIDORES: ESTUDO DE CASO DO FIAT 500E**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós- Graduação em Engenharia Elétrica do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET-MG em associação ampla com a Universidade Federal de São João Del Rei – UFSJ, como requisito necessário para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof.^a Dr.^a Patrícia Romeiro da Silva Jota

Belo Horizonte
2017

Fernanda Cortezzi

O veículo elétrico e o impacto na curva de carga de consumidores: Estudo de caso do Fiat 500e

Trabalho apresentado para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, PPGEL, parceria ampla UFSJ e CEFET-MG.

Belo Horizonte, 2017.

Prof.^a Dr.^a Patrícia Romeiro da Silva Jota – Orientadora

Prof. Dr. Lauro de Vilhena Brandão Machado Neto

Prof. Dr. Frederico Romagnoli Silveira Lima

Prof. Dr. Eduardo Gonzaga da Silveira

À minha família.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, que me ajudou a superar todos os obstáculos e chegar até aqui.

Agradeço à minha família, minha estrela guia, meu suporte, minha alegria.

Ao meu pai, Fernando Cortezzi, pelo maravilhoso exemplo.

À minha mãe, Terezinha Cortezzi, pelo amor incondicional.

Ao meu marido, Gabriel Esteves, pela paciência e companheirismo.

Ao meu irmão, Francisco Cortezzi, pela nossa parceria e cumplicidade.

À Rafaela Camilo, mais que irmã, por deixar meus dias sempre mais alegres.

Aos amigos de verdade, que há muito tempo são considerados como mais um membro da minha família (Eles saberão quem são!).

Aos colegas da FIAT, em especial, Leonardo Cavaliere e Clovis Sousa por me ajudarem muito na realização deste trabalho.

À professora Patrícia Jota, pela enorme ajuda dada para que eu encontrasse o caminho a ser seguido.

A todos do PPGEEL e colegas do CEFET-MG, que compartilharam da mesma jornada.

E àqueles, que nos momentos mais difíceis, com palavras e gestos, contribuíram para que eu prosseguisse adiante.

“O primeiro a pedir desculpas é o mais corajoso.

O primeiro a perdoar é o mais forte.

O primeiro a esquecer é o mais feliz”.

Papa Francisco

RESUMO

Desde a invenção da roda, a busca do semovente, um veículo capaz de se mover sozinho, sempre foi um sonho perseguido pelo homem. No século XIX já existiam três tecnologias de propulsão utilizada nos automóveis: vapor, combustão e elétrico. O motor a combustão se tornou a tecnologia predominante a partir da descoberta de grandes jazidas de petróleo no estado americano do Texas. O conceito de desenvolvimento sustentável incentivou o retorno dos veículos elétricos ao cenário automotivo mundial, como alternativa para reduzir os níveis de emissão de dióxido de carbono, que aumenta o efeito estufa e contribui para o aquecimento global. A bateria ainda representa a grande limitação do veículo elétrico. Atualmente a bateria de Li-íon é a mais avançada e a associação com ultracapacitores tem contribuído com o aumento da vida útil da bateria e do desempenho do automóvel. Outra funcionalidade presente no veículo elétrico é a frenagem regenerativa, que tem contribuído com o aumento da autonomia do veículo ao transformar a energia cinética das rodas em energia elétrica, que é drenada para o banco de baterias. O veículo elétrico é denominado *plug-in* devido à *necessidade de ser conectado à rede elétrica para a realização da recarga da bateria*. Devido às preocupações sobre o impacto provocado pelo veículo elétrico no sistema elétrico de potência, foi analisado o comportamento de recarga do veículo elétrico Fiat 500e embasado em normas que se referem à qualidade de energia. Na sequência, os dados medidos durante a recarga foram inseridos na curva de carga de consumidores em diferentes cenários de recarga. Os resultados encontrados contribuem para o entendimento da recarga do veículo elétrico. A recarga em diferentes horários do dia afeta de forma diferente as curvas de carga dos consumidores e consequentemente, de diferentes maneiras o sistema elétrico de potência.

Palavras-Chave: Veículo Elétrico, Recarga, Fiat 500e, Curva de Carga, Consumo.

ABSTRACT

Since the invention of the wheel, the man wish to find something that can be move alone. There were three types of vehicle technology in the 19th century: steam car, combustion car and electric car. But the combustion car became the predominant technology due to the discovery of huge oil fields in Texas, US. However, the concern about environmental pollution has contributed to the return of electric vehicle, as an alternative to reduce the greenhouse effect. Therefore, low autonomy and the time it takes to recharge remain as the great disadvantages of electric vehicles. The most advanced battery used in electric car is the Li-ion battery. The battery is used together with ultra-capacitors to contribute with the increase of performance of car and extend the life time of battery. Regenerative braking system is the other technology present in electric vehicle. It converts the braking energy in electric energy that it is transferred to the bank of batteries and it contributes to extend the autonomy of the electric vehicle. Every electric vehicle is a plug-in car because it requires to connect to grid to recharge the battery. Therefore, most of electronic devices can cause distribution circuit congestion and affect the power quality. The study presents the behavior of main electric parameters during the recharge of the electric vehicle Fiat 500e. The analysis of results were done based on the limits recommended by national and international standards about quality of energy. In sequence, these parameters were included on load curve of Brazilian consumers in different scenarios of recharge. The results contribute to discuss the general effect on distribution system caused by the spread of electric vehicle and how the recharge in different time of the day can affect the consumption and consequently the Power System.

Key-words: Electric Vehicle; Vehicle Charging; Fiat 500e; Load Curve, Consumption.

LISTA DE FIGURAS:

Figura 1: Locomotiva elétrica Galvani	23
Figura 2: Veículo a vapor desenvolvido por Nicolas Cugnot	24
Figura 3: Veículo a combustão desenvolvido por Karl Benz	25
Figura 4: Partida a manivela nos veículos a combustão	26
Figura 5: Jenatzy a bordo do “La Jamais Contenté”	27
Figura 6: Réplica funcional do híbrido série Lohner Porsche Semper Vivus	28
Figura 7: Thomas Edison ao lado do Detroit Electric	29
Figura 8: Peugeot trazido da França por Santos Dumont.....	32
Figura 9: Veículo movido a gasogênio.....	33
Figura 10: Aero Willys 2600.....	34
Figura 11: Gurgel Itaipu	35
Figura 12: Fiat Palio Weekend Elétrico	37
Figura 13: Veículo elétrico BMW i3.....	39
Figura 14: Veículo elétrico GM EV1	41
Figura 15: Nissan Leaf e detalhe dos conectores de carregamento rápido e lento.....	42
Figura 16: Grupos de veículos elétricos	44
Figura 17: Principais configurações dos automóveis no mercado.	47
Figura 18: Variação do torque com a velocidade para MCI e motor elétrico	49
Figura 19: Densidade Energética e Densidade de Potência de diferentes tipos de baterias.....	53
Figura 20: Gráfico de descarga de uma bateria de Li-íon	55
Figura 21: Diagrama de limites de tensão de uma bateria.....	57
Figura 22: Modos de operação da bateria de um VEHP	58
Figura 23: Modelo linear de uma bateria	59
Figura 24: Modelo modificado de Thevenin de uma bateria.....	60
Figura 25: Conversores CC-CC bidirecional	63
Figura 26: Frenagem regenerativa	65
Figura 27: Quadrante de acionamento da máquina elétrica	65
Figura 28: Diagrama estrutural do veículo elétrico	66
Figura 29: Gráfico da frenagem de um veículo com RBS	67
Figura 30: Conversor CC-CC bidirecional básico.....	68
Figura 31: Modos de carregamento conforme IEC 61851	71
Figura 32: Fiat 500 lançado em 1957	73
Figura 33: Fiat Cinquecento	74

Figura 34: Terceira geração do Fiat 500.....	74
Figura 35: Fiat 500e.....	75
Figura 36: Configuração do Fiat 500e.....	79
Figura 37: Carregador portátil do Fiat 500e	81
Figura 38: Estação de carregamento.....	81
Figura 39: Conector SAE J1772.....	82
Figura 40: Indicação de modo de carga abaixo do limite permitido	83
Figura 41: Indicações do quadro de instrumentos do Fiat 500e	84
Figura 42: Indicador de estado de carga da bateria do Fiat 500e	85
Figura 43: Painel do Fiat 500e equipado com GPS Tom Tom.....	86
Figura 44: Ciclo de direção urbano UDDS	88
Figura 45: Ciclo de direção de estrada HWFET.....	88
Figura 46: EVSE portátil do Fiat 500e	92
Figura 47: Medidor DMG210.....	93
Figura 48: Carregamento do Fiat 500e	95
Figura 49: Cenário 1 de recarga	96
Figura 50: Cenário 2 de recarga	97
Figura 51: Cenário 3 de recarga	98
Figura 52: Tensão e DHTv entre L1-L2, durante recarga iniciada em 70% SOC	98
Figura 53: Tensão e DHTv em L1, durante recarga iniciada em 70% SOC	99
Figura 54: Tensão e DHTv em L2, durante recarga iniciada em 70% SOC	99
Figura 55: Corrente e DHTi em L1, durante recarga iniciada em 70% SOC.....	100
Figura 56: Corrente e DHTi em L2, durante recarga iniciada em 70% SOC.....	100
Figura 57: Potências P, Q, S e FP entre L1-L2, durante recarga iniciada em 70% SOC	101
Figura 58: Potências P, Q, S e FP em L1, durante recarga iniciada em 70% SOC	101
Figura 59: Potências P, Q, S e FP em L2, durante recarga iniciada em 70% SOC	102
Figura 60: Tensão e DHTv entre L1-L2, durante recarga iniciada em 80% SOC	103
Figura 61: Tensão e DHTv em L1, durante recarga iniciada em 80% SOC	103
Figura 62: Tensão e DHTv em L2, durante recarga iniciada em 80% SOC	103
Figura 63: Corrente e DHTi em L1, durante recarga iniciada em 80% SOC.....	104
Figura 64: Corrente e DHTi em L2, durante recarga iniciada em 80% SOC.....	104
Figura 65: Potências P, Q, S e FP entre L1-L2, durante recarga iniciada em 80% SOC	105
Figura 66: Potências P, Q, S e FP em L1, durante recarga iniciada em 80% SOC	105
Figura 67: Potências P, Q, S e FP em L2, durante recarga iniciada em 80% SOC	106
Figura 68: Curva de carga da residência de classe média em dias úteis	109

Figura 69: Curva de carga da residência de classe alta em dias úteis	109
Figura 70: Curva de carga do estabelecimento comercial em dias úteis	110
Figura 71: C1 - Curva da residência de classe média, entre fases (L1-L2).....	111
Figura 72: C1 - Curva da residência de classe média, na fase L1	111
Figura 73: C1 - Curva da residência de classe média, na fase L2	112
Figura 74: C1 - Curva da residência de classe alta, entre fases (L1-L2).....	113
Figura 75: C1 - Curva da residência de classe alta, na fase L1	114
Figura 76: C1 - Curva da residência de classe alta, na fase L2	114
Figura 77: C2 - Curva da residência de classe média, entre fases (L1-L2).....	116
Figura 78: C2 - Curva da residência de classe média, na fase L1	117
Figura 79: C2 - Curva da residência de classe média, na fase L2	117
Figura 80: C2 - Curva da residência de classe alta, entre fases (L1-L2).....	119
Figura 81: C2 - Curva da residência de classe alta, na fase L1	119
Figura 82: C2 - Curva da residência de classe alta, na fase L2	120
Figura 83: C3 - Curva do estabelecimento comercial, entre fases (L1-L2)	122
Figura 84: C3 - Curva do estabelecimento comercial, na fase L1.....	122
Figura 85: C3 - Curva do estabelecimento comercial, na fase L2.....	123
Figura 86: C3 - Curva da residência de classe média, entre fases (L1-L2).....	124
Figura 87: C3 - Curva da residência de classe média, na fase L1	125
Figura 88: C3 - Curva da residência de classe média, na fase L2	125
Figura 89: C3 - Curva da residência de classe alta, entre fases (L1-L2).....	127
Figura 90: C3 - Curva da residência de classe alta, na fase L1	128
Figura 91: C3 - Curva da residência de classe alta, na fase L2	128
Figura 92: Comparativo entre Tarifa Branca e Tarifa Convencional.....	130
Figura 93: C1 - Curva da residência de classe alta, entre fases (L1-L2).....	132
Figura 94: C2 - Curva da residência de classe alta, entre fases (L1-L2).....	133

LISTA DE TABELAS:

Tabela 1: Especificações técnicas do Gurgel Itaipu elétrico	35
Tabela 2: Especificações técnicas do Fiat Palio Weekend Elétrico	37
Tabela 3: Veículos híbridos e elétricos comercializados no Brasil	39
Tabela 4: Especificações técnicas do Nissan Leaf	42
Tabela 5: Comparação de combustíveis	49
Tabela 6: Operação do conversor CC-CC bidirecional básico.....	68
Tabela 7: Modos de carregamento conforme IEC 61851.....	72
Tabela 8: Dados do motor do Fiat 500e	77
Tabela 9: Dados da bateria do Fiat 500e	78
Tabela 10: Comparativo entre Fiat 500 e Fiat 500e	80
Tabela 11: Tipos de recarga do Fiat 500e.....	82
Tabela 12: Indicador de estado de carga da bateria do Fiat 500e.....	85
Tabela 13: Conversão da autonomia do Fiat 500e	89
Tabela 14: Características técnicas do medidor DMG210	93
Tabela 15: Parâmetros elétricos medidos pelo medidor DMG210.....	94
Tabela 15: Tempo de recarga do Fiat 500e	96
Tabela 16: Cenários de recarga do Fiat 500e	108
Tabela 17: C1 - Consumo residência classe média	113
Tabela 18: C1 - Consumo residência classe alta	115
Tabela 19: C2 - Consumo residência classe média	118
Tabela 20: C2 - Consumo residência classe alta	120
Tabela 21: C3 – Consumo estabelecimento comercial.....	123
Tabela 22: C3 - Consumo residência classe média	126
Tabela 23: C3 - Consumo residência classe alta	129
Tabela 24: Tarifa Branca	131
Tabela 25: C1 - Tarifa Branca na residência classe alta.....	133
Tabela 26: C2 – Tarifa Branca na residência classe alta	134
Tabela 27: Dados da curva de carga residencial de classe média	150
Tabela 28: Dados da curva de carga residencial de classe alta	153
Tabela 29: Dados da curva de carga de um estabelecimento comercial	156

LISTA DE SIGLAS:

ABVE	Associação Brasileira de Veículos Elétricos
ANEEL	Agencia Nacional de Energia Elétrica
C1	Cenário 1 de recarga do Fiat 500e
C2	Cenário 2 de recarga do Fiat 500e
C3	Cenário 3 de recarga do Fiat 500e
CA	Corrente Alternada
CARB	<i>California Air Resources Board</i> (Conselho de Qualidade do ar da Califórnia)
CC	Corrente Contínua
CD	Carga Depletada
CO ₂	Dióxido de Carbono
CS	Carga Sustentada
DHTi	Distorção Harmônica Total de Corrente
DHTv	Distorção Harmônica Total de Tensão
EUA	Estados Unidos da América
EVSE	<i>Electric Vehicle Supply Equipment</i> (Equipamento de abastecimento do veículo elétrico)
FC	<i>Fuel Cell</i> (Célula a Combustível)
FCA	Fiat Chrysler Automobiles
GM	General Motors
GNV	Gás Natural Veicular
GPS	<i>Global Positioning System</i> (Sistema de Posicionamento Global)
HWFET	<i>Highway Fuel Economy Driving Schedule</i> (Teste de Economia de Combustível em Estrada)
IPVA	Imposto sobre Propriedade de Veículos Automotores
Li-íon	Bateria de íon-Lítio
MCI	Motor a Combustão Interna
MPGe	Milhas por Galão
NiMH	Bateria de Níquel Metal Hidreto
OPEP	Organização dos Países Exportadores de Petróleo
PCC	<i>Point of Common Coupling</i> (Ponto de Acoplamento Comum)
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional
RBS	<i>Regenerative Braking System</i> (Sistema de Frenagem Regenerativa)
SAE	Sociedade de Engenheiros Automotivos
SEP	Sistema Elétrico de Potência
SOC	<i>State of Charge</i> (Estado de carga da bateria)
S&S	<i>Start & Stop</i>
UDDS	<i>Urban Dynamometer Driving Schedule</i> (Ciclo de Uso Urbano em Dinamômetro)
VE	Veículo Elétrico
VEH	Veículo Elétrico Híbrido
VEHCC	Veículo Elétrico Híbrido à Célula a Combustível
VEHP	Veículo Híbrido Elétrico Paralelo

VW
ZEV

Volkswagen
Zero Emmission Vehicle (Veículo de Emissão Zero)

LISTA DE SIMBOLOS:

C	Taxa de descarga da bateria
C_p	Capacitância de polarização
E_p	Energia prática da bateria
E_t	Energia teórica da bateria
F_{aero}	Força aerodinâmica
$F_{driveline}$	Força do eixo de tração
$F_{M/G}$	Força do motor/gerador
F_{rr}	Força de resistência ao rolamento
F_{trac}	Força de tração
$F_{trans,I}$	Força de transmissão
$F_{w/t}$	Força das rodas
i	Corrente
I_{bat}	Corrente elétrica da bateria
I_{desc}	Corrente de descarga da bateria
Q_{total}	Capacidade energética total da bateria
$R\$$	Símbolo da moeda do Brasil, denominado Real
R_{bat}	Resistência no terminal da bateria
R_c	Resistência interna de recarga
R_d	Resistência interna de descarga
R_{int}	Resistência interna equivalente
t_0	Tempo onde a bateria está completamente carregada
t_{corte}	Tempo onde a bateria está completamente descarregada
$US\$$	Símbolo da moeda dos Estados Unidos, denominado Dólar
V	Tensão nominal
V_0	Tensão interna
V_{bat}	Tensão da bateria
V_{max100}	Estado de carga da bateria em 100%
V_{maxop}	Máxima tensão de operação da bateria
$V_{maxpulse}$	Máximo valor de pulsos de curta duração suportados pela bateria
V_{min0}	Estado de carga da bateria em 0%
$V_{min_{LowT}}$	Mínima tensão permitida a 0 °C
V_{minop}	Mínima tensão de operação da bateria
$V_{minpulse}$	Mínimo valor de pulsos de curta duração suportados pela bateria
V_p	Tensão da capacitância de polarização

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO E OBJETIVOS	17
1.1.	Motivação	18
1.2.	Objetivo geral	19
1.3.	Metodologia.....	20
1.4.	Estrutura do trabalho	21
2.	AUTOMÓVEL ELÉTRICO	22
2.1.	A evolução dos veículos elétricos	22
2.1.1.	<i>Os primeiros automóveis</i>	22
2.1.2.	<i>Os pioneiros elétricos</i>	26
2.1.3.	<i>O declínio da mobilidade elétrica</i>	29
2.1.4.	<i>A retomada do veículo elétrico</i>	31
2.2.	A trajetória do automóvel no Brasil	32
2.3.	Veículo elétrico no cenário atual	40
3.	PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DO VEÍCULO ELÉTRICO	44
3.1.	Classificação dos veículos elétricos	44
3.2.	Veículos elétricos vs. Veículos a combustão	47
3.3.	Baterias e ultracapacitores	51
3.3.1.	<i>Baterias nos veículos elétricos</i>	51
3.3.2.	<i>Energia de armazenamento das baterias</i>	53
3.3.3.	<i>Energia de operação das baterias</i>	56
3.3.4.	<i>Resistência interna de uma bateria</i>	59
3.3.5.	<i>Ultracapacitores</i>	61
3.4.	Frenagem regenerativa	64
3.5.	Carregamento lento e rápido	69
4.	FIAT 500 ELÉTRICO	73
4.1.	A história do Fiat 500	73
4.2.	Fiat 500 elétrico	75
4.2.1.	<i>Características técnicas do Fiat 500e</i>	76
4.2.2.	<i>Carregamento da bateria do veículo</i>	80
5.	RECARGA DO FIAT 500E	87
5.1.	Desempenho energético do Fiat 500e.....	87
5.2.	Comportamento da recarga do Fiat 500e.....	89
5.2.1.	<i>Recarga inicial em 70% SOC</i>	98
5.2.2.	<i>Recarga inicial em 80% SOC</i>	102
6.	ANÁLISE DO CONSUMO DO FIAT 500E NO SISTEMA ELÉTRICO	107
6.1.	Consumo durante Cenário 1	110

6.1.1. Consumo da residência de classe média para o Cenário 1	110
6.1.2. Consumo da residência de classe alta para o Cenário 1	113
6.2. Consumo durante Cenário 2	115
6.2.1. Consumo da residência de classe média para o Cenário 2	116
6.2.2. Consumo da residência de classe alta para o Cenário 2	118
6.3. Consumo durante Cenário 3	121
6.3.1. Consumo do estabelecimento comercial para o Cenário 3.....	121
6.3.2. Consumo da residência de classe média para o Cenário 3	124
6.3.3. Consumo da residência de classe alta para o Cenário 3.....	127
6.4. Tarifa Branca	130
6.4.1. Tarifa Branca na residência de classe alta para o Cenário 1	132
6.4.2. Tarifa Branca na residência de classe alta para o Cenário 2	133
6.5. Análise dos resultados	134
7. CONCLUSÕES.....	136
8. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	142
REFERÊNCIAS	143
ANEXO A	150
A.1 Curva de carga residencial de classe média.....	150
A.2 Curva de carga residencial de classe alta.....	153
A.3 Curva de carga de um estabelecimento comercial.....	156

1. INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

Atualmente, é impossível pensar em mobilidade urbana sem considerar a presença dos automóveis. Uma pequena parcela do mercado automotivo tem sido ocupada pelos veículos elétricos. Movimentos ambientalistas fizeram com que a mobilidade elétrica ressurgisse no século XXI, em especial, porque os automóveis a combustão, devido à emissão de gases de seus escapamentos, passaram a ser vistos como uma das principais fontes de poluição atmosférica.

Com o avanço do mercado de veículos elétricos, assuntos relacionados aos automóveis elétricos tem se tornado cada vez mais frequentes no meio acadêmico. Apesar de todos esses avanços, a bateria de veículo ainda é a grande limitação tecnológica e econômica desta motorização, resultando em baixa autonomia e longo tempo de recarga.

Muitas pesquisas têm sido realizadas visando solucionar a baixa autonomia e o impacto do consumo de energia. Sobre a baixa autonomia de veículos elétricos, as principais pesquisas estão relacionadas às novas tecnologias de baterias e carregadores.

Um estudo realizado por Cao e Emadi (2012) propõe uma nova configuração do sistema de armazenamento híbrido (HESS – *Hybrid Energy Storage System*), onde é possível atingir um melhor desempenho do veículo e estender a vida da bateria através da combinação da bateria, ultracapacitores e conversores bidirecionais. Em relação aos carregadores foi estudado, por Gao e Guo (2013), um método para fornecer o posicionamento das estações de recarga de veículos elétricos. Os autores relatam que a premissa da popularidade dos veículos elétricos depende do número e do posicionamento dos postos de recarga.

Há uma preocupação sobre como o veículo elétrico pode afetar o Sistema Elétrico. Um estudo baseado em medições e análises da propagação de harmônicos foi realizado por Rodrigues *et al.* (2013). O estudo comprova que a contaminação de harmônicos não é tão crítica quanto pensava a maioria dos pesquisadores e engenheiros do sistema de potência. O estudo também comprova que a distorção harmônica de corrente e tensão de um grupo de

veículos elétricos não apresenta o mesmo valor da soma direta da distorção harmônica de um único veículo.

O desenvolvimento da mobilidade elétrica tem despertado o interesse em vários âmbitos de pesquisa, visto que esta tecnologia ainda apresenta obstáculos a serem vencidos.

O presente trabalho apresenta a trajetória percorrida pelo veículo elétrico até os dias atuais e as tecnologias aplicadas aos veículos de forma a melhorar seu desempenho. O presente trabalho realiza um estudo de caso no veículo elétrico Fiat 500e a fim de se conhecer o comportamento dos parâmetros elétricos durante a recarga do veículo e como a inserção desta nova carga impacta no aumento da demanda de energia.

1.1. Motivação

Desde o Protocolo de Kyoto, onde foi assinado um tratado sobre a redução da emissão de gases que agravam o efeito estufa, várias iniciativas têm sido tomadas a fim de incentivar a adoção de novas alternativas energéticas que causem baixo impacto ambiental (Noce, 2009). Os automóveis a combustão são vistos como uma das principais fontes de poluição atmosférica e devido a isto tem crescido o número de veículos elétricos no mercado automotivo, como resultado das recentes políticas de incentivo (Martins e Brito, 2011).

Os veículos elétricos contribuem para a redução dos níveis de poluição atmosférica e sonora, já que não produzem ruído e nem emissão de dióxido de carbono. As vendas têm crescido continuamente, apesar das dúvidas dos consumidores em relação ao alto custo do automóvel, a confiabilidade da tecnologia e o tempo de recarga das baterias (Barassa, 2015).

Uma das grandes desvantagens dos veículos elétricos está associada à baixa autonomia e devido à preocupação com a disponibilidade dos veículos, estes serão recarregados sempre que possível. Segundo GE (2012), devido à quantidade insuficiente de postos de recarga, a maioria dos veículos elétricos serão recarregados no trabalho ou em seus domicílios.

O crescente número de veículos elétricos preocupa, visto que, pelo ponto de vista do sistema elétrico de potência, representa mais uma carga a ser suprida pelo sistema. Como qualquer carga eletroeletrônica, pode gerar distorções harmônicas e injeção de potência reativa na rede, afetando a qualidade de energia (Rodriguez *et al.* 2013).

De acordo com Berger e Iniewski (2012), a recarga de um veículo elétrico em um domicílio pode dobrar o consumo de energia da residência. Vários domicílios conectados a um mesmo transformador, ao recarregar seus veículos podem causar sobrecarga no sistema, em especial nos horários de ponta, onde já operam com temporárias sobrecargas.

Dentro deste cenário, o comportamento da recarga de um veículo elétrico e o impacto da recarga do veículo no sistema elétrico foi o que motivou a realização deste trabalho.

1.2. Objetivo geral

Esta dissertação tem por objetivo apresentar a evolução dos automóveis elétricos e o quanto eles têm se tornado essencial no âmbito ambiental e questões energéticas. Será analisado principalmente o comportamento da bateria como uma nova carga a ser inserida no Sistema Elétrico de Potência (SEP) e como a recarga do veículo elétrico irá afetar a curva de carga de consumidores.

A fim de alcançar o objetivo geral, estabeleceram-se os seguintes objetivos específicos:

- Introduzir a história do automóvel e o quanto ele esteve relacionado a interesses socioeconômicos e ambientais no Brasil e no mundo;
- Apresentar as configurações dos tipos de automóveis presentes no mercado atual;
- Apresentar e analisar os parâmetros elétricos encontrados durante a recarga da bateria de alta tensão do veículo elétrico Fiat 500e;

- Avaliar o impacto da recarga do veículo elétrico na curva de carga de consumidores, em diferentes cenários de recarga propostos neste trabalho.

1.3. Metodologia

A metodologia adotada para esta dissertação tem como principal objetivo a medição dos parâmetros elétricos durante a recarga do Fiat 500e e a análise do comportamento da curva de carga de consumidores ao inserir a recarga de um veículo elétrico.

A metodologia adotada neste trabalho de pesquisa inclui os seguintes estudos e realizações:

- Revisão bibliográfica sobre a história do automóvel, evolução do veículo elétrico, suas configurações e características atuais;
- Apresentação das funcionalidades do Fiat 500e;
- Análise dos dados de carga da bateria do veículo elétricos Fiat 500e;
- Analisar o efeito desta carga na curva de carga de consumidores, em diferentes cenários de recarga;
- Conclusão dos resultados encontrados.

Para avaliar o comportamento do consumo durante a recarga do VE Fiat 500e, o veículo foi submetido à recarga no Nível 2 de carregamento, em 220 V (AC) e 60 Hz, utilizando o EVSE portátil fornecido juntamente com o veículo. A escolha pelo EVSE portátil foi devido à maior frequência por este tipo de recarga, visto que nem todos os usuários irão adquirir a estação de carregamento nas concessionárias autorizadas.

Para avaliar o impacto da recarga, os dados de potência ativa e reativa, obtidos durante a medição da recarga, foram inseridos em curvas de carga de consumidores em diferente cenários de carregamento.

1.4. Estrutura do trabalho

O presente trabalho está organizado em 7 capítulos que se encontram descrito de maneira resumida abaixo:

O Capítulo 1 apresenta a introdução do trabalho, com a abordagem inicial do tema e a estrutura da organização desta dissertação;

O Capítulo 2 aborda a trajetória do automóvel no mundo e no Brasil. Como surgiram os automóveis, a partir de quando houve a soberania dos veículos a combustão e a retomada dos veículos elétricos no cenário automotivo atual.

O Capítulo 3 apresenta as principais características do veículo elétrico, em especial, suas particularidades em relação à motorização, baterias e frenagem regenerativa.

O Capítulo 4 apresenta o veículo elétrico em estudo, o Fiat 500e, abordando seu funcionamento e a gestão realizada para o controle da capacidade da bateria.

O Capítulo 5 apresenta e analisa os dados obtidos durante a recarga do veículo embasados em normas que se referem à qualidade de energia.

O Capítulo 6 analisa o impacto do consumo do veículo elétrico na curva de carga de consumidores, em diferentes cenários de recarga propostos neste trabalho.

No Capítulo 7 encontra-se a conclusão de todo o trabalho realizado, inclusive dos resultados encontrados e da relevância desta análise realizada.

E por último, encontram-se as principais referências bibliográficas utilizadas para a realização dessa dissertação.

2. AUTOMÓVEL ELÉTRICO

Este capítulo apresenta uma introdução da evolução dos veículos elétricos e sua trajetória até os dias de hoje. Também aborda a história do automóvel no Brasil e o atual cenário dos veículos elétricos no país.

2.1. A evolução dos veículos elétricos

Nesta será apresentada a trajetória do automóvel até a ascensão dos veículos elétricos, o declínio da mobilidade elétrica e a retomada do veículo elétrico no cenário mundial devido às questões ambientais da atualidade.

2.1.1. Os primeiros automóveis

Perracini (1990) destaca que, desde a invenção da roda, a busca do semovente – um veículo capaz de se mover sozinho – sempre foi um sonho perseguido pelo homem. Com a invenção do motor a vapor por Thomas Newcomen e aperfeiçoada por James Watt, na metade do século XVIII, foi possível o surgimento de um veículo esquisito e barulhento, uma carroça capaz de andar sozinha – a carruagem sem cavalos.

Os primeiros automóveis não tinham personalidade própria e quase tudo era emprestado dos veículos de tração animal: rodas, eixos, carroceria e freios. De exclusivo tinham a transmissão, direção e o motor. Os franceses foram os primeiros a se dedicarem no desenvolvimento desta máquina e deram-lhe o nome “Automobile” que é uma combinação do grego e latim (“*auto*” e “*mobilis*”) que significa “o que anda por si mesmo” (Perracini, 1990).

A mobilidade elétrica, conforme descrito por Martins e Brito (2011), só foi possível após o desenvolvimento da propulsão elétrica e do armazenamento da eletricidade. O caminho da propulsão elétrica se iniciou com a descoberta do eletromagnetismo, em 1820, pelo dinamarquês Hans Christian Oersted, que comprovou que o campo elétrico e campo magnético estão intimamente relacionados, ao constatar que correntes elétricas induzem

campos magnéticos e vice-versa. A partir da descoberta de Oersted, o inglês Michael Faraday, em 1821, utilizou do princípio da indução eletromagnética para desenvolver um dispositivo capaz de converter energia elétrica em energia mecânica, surgindo assim o primeiro motor (Martins e Brito, 2011).

A tecnologia de armazenamento da eletricidade se iniciou no século XVIII, no ano 1745, com o desenvolvimento da garrafa de Leiden, que consistia em uma espécie primitiva de capacitor capaz de armazenar energia elétrica. Em 1800, o italiano Alessandro Volta desenvolveu a pilha galvânica, também denominada como “bateria de Volta”, composta por placas de chumbo imersas em ácido sulfúrico que ficaram conhecidas como baterias de chumbo-ácido. Anos depois, o francês Raymond Gaston Planté inventou, em 1859, a primeira bateria recarregável comercial de chumbo-ácido (Martins e Brito, 2011).

A Figura 1 ilustra a locomotiva elétrica Galvani, considerada o primeiro veículo movido à eletricidade. Segundo Martins e Brito (2011), foi apresentada em 1842 pelo escocês Robert Davidson. Na apresentação, a locomotiva percorreu mais de 2 km sobre trilhos, entre as cidades escocesas de Edimburgo e Glasgow, a uma velocidade superior a 6 km/h. A Galvani era alimentada por baterias não recarregáveis de zinco-ácido pesando aproximadamente 5 toneladas.



Figura 1: Locomotiva elétrica Galvani
Fonte: Martins e Brito, 2011

Perracini (1990) acrescenta que, no século XIX, existiam três tecnologias de propulsão utilizadas nos automóveis: vapor, combustão e eletricidade. O primeiro veículo a vapor que se tem notícias foi construído, em 1769, pelo militar francês Nicolas Joseph Cugnot, que fazia

experiências com motores a vapor para o transporte de material militar. O veículo era um triciclo, construído em madeira, que foi utilizado pelo exército francês para transportar canhões a uma velocidade de 4 km/h. Um exemplar deste veículo encontra-se preservada no Museu de Artes e Ofícios em Paris conforme mostra a Figura 2. (Musée des arts et métiers, 2016).

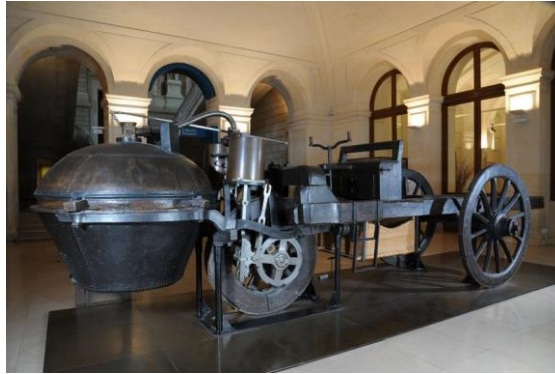


Figura 2: Veículo a vapor desenvolvido por Nicolas Cugnot

Fonte: Musée des arts et métiers, 2016

O veículo a combustão surgiu após o desenvolvimento do motor a combustão, em 1876, por Nikolaus August Otto. Este engenheiro alemão inventou o motor de combustão interna do ciclo de Otto, mais conhecido como motor a gasolina. O funcionamento do “Ciclo de Otto” se baseia em quatro tempos: Admissão, compressão, combustão e exaustão; e esse princípio de funcionamento é aplicado aos motores a gasolina até os dias de hoje. Após a invenção de Otto, o alemão Karl Friedrich Michael Benz patenteou, em 1886, o primeiro automóvel com motor a combustão interna, o Benz Patent-Motorwagen ilustrado na Figura 3 (Barassa, 2015).

Segundo Barassa (2015), entre os anos de 1905 a 1920 houve uma acirrada competição entre os motores elétrico, a vapor e a combustão interna. Durante esse período ocorreu um crescimento expressivo da comercialização de automóveis, principalmente nos Estados Unidos. O autor ainda afirma que a competição pelo tipo de motor dominante ocorreu principalmente em solo norte-americano.



Figura 3: Veículo a combustão desenvolvido por Karl Benz
 Fonte: Barassa, 2015

As três tecnologias de propulsão veicular tinham grandes desafios a serem superados. Os carros a vapor necessitavam de pré-aquecimento de no mínimo vinte minutos antes do deslocamento e apresentavam grande consumo de água. Os carros a gasolina tinham dificuldade na partida e emitiam alto barulho. Os carros elétricos possuíam baixa velocidade e baixa autonomia. As três formas de motorização, naquela época, não tinham uma adequada infraestrutura de reabastecimento (Barassa, 2015).

O motor a vapor foi largamente utilizado nos automóveis entre o fim do século XIX e início do século XX, porém, apresentava como principal desafio a necessidade da diminuição da sua dimensão volumétrica, visto que os automóveis de passeio requisitavam motores cada vez mais compactos e com melhor relação peso/potência. A tecnologia não superou seus desafios e foi se tornando obsoleta no início do século XX (Barassa, 2015).

A bateria recarregável de chumbo-ácido, desenvolvida por Planté, contribuiu para a proliferação dos veículos elétricos e a combustão interna (considerados daqui em diante apenas como veículos a combustão). Os automóveis do início do século XIX ainda não tinham gerador para recarregar a bateria, sendo necessário recarregá-las em casa.

A partida dos veículos a combustão foi desenvolvida pelo americano Charles Franklin Kettering, em 1908, denominada partida a manivela (Perracini, 1990). A manivela, localizada

na frente do veículo, fazia o papel do motor de arranque. Como pode ser observado na Figura 4, para dar partida no automóvel era necessário girar a manivela, que produzia uma faísca, dando início à combustão e ao funcionamento do motor a combustão. Tal manobra era uma tarefa cansativa e perigosa, exigia esforço e causava riscos à integridade física devido a possíveis contragolpes causados pelo motor a combustão.

A aversão à partida a manivela foi o que tornou os veículos elétricos os preferidos pelo público feminino da época, pois não exigiam longas sessões de manivela, especialmente nas frias manhãs, além de não produzirem barulho e nem fumaça (Noce, 2009).



Figura 4: Partida a manivela nos veículos a combustão
Fonte: Autoentusiastas, 2014

2.1.2. Os pioneiros elétricos

No final do século XIX havia uma significativa quantidade de veículos elétricos em circulação na Europa e nos Estados Unidos e, entre os anos de 1890 e 1910, os veículos elétricos chegaram a ser líderes do mercado automobilístico. Os autores Martins e Brito (2011) destacam a primeira corrida automotiva oficial em circuito - “*Providence Horseless Carriage Race*” – que ocorreu em 1896 na cidade americana Narragansett, onde veículos elétricos e a combustão competiram juntos.

Nas primeiras corridas da *Providence Horseless Carriage Race*, os veículos elétricos foram os vencedores, dentre eles o veículo Riker Electric desenvolvido, em 1894, pelo

americano Andrew L. Riker, que atingia a velocidade de 10 milhas por hora (≈ 16 km/h) com autonomia de até 4 horas. Anos depois, em 1904, Andrew Riker se tornou o primeiro presidente da Sociedade de Engenheiros Automotivos (SAE - *Society of Automobile Engineers*) que tem por missão disseminar a tecnologia e o progresso da mobilidade dos segmentos automotivos e aeroespacial (Duffie, 2016).

Em uma corrida realizada pelo *Automobile Club de France*, em 29 de abril de 1899, o belga Camille Jenatzy apresentou o veículo elétrico “La Jamais Contente”. Ilustrado na Figura 5, o “La Jamais Contente” se tornou o primeiro veículo a ultrapassar a velocidade de 100 km/h (Martins e Brito, 2011).

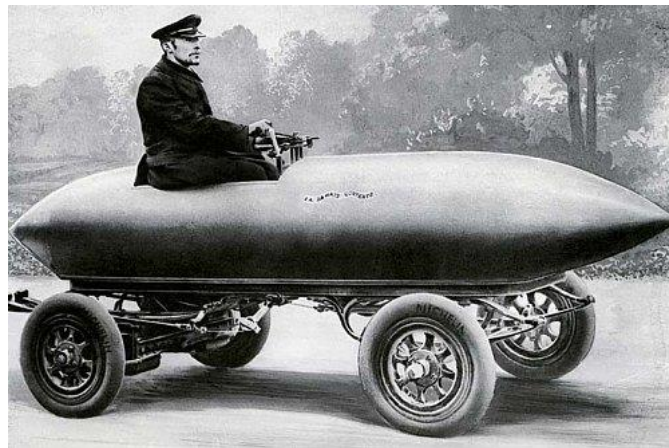


Figura 5: Jenatzy a bordo do “La Jamais Contente”
Fonte: Martins e Brito, 2011

Além dos três motores utilizados na propulsão dos automóveis no século XIX, surgiu no século XX um novo modelo de propulsão, resultado da combinação dos motores elétrico e a combustão, denominado híbrido. O primeiro automóvel elétrico híbrido foi o Lohner-Porsche Semper Vivus, desenvolvido pelo alemão Ferdinand Porsche, em 1900. Porsche instalou um motor a combustão ligado a um gerador para apenas produzir eletricidade para as baterias, sem ligação mecânica às rodas. Com esta nova tecnologia, nascia o primeiro veículo híbrido de configuração série. Atualmente há uma réplica funcional deste veículo no Museu Porsche, na cidade alemã Stuttgart como pode ser observado na Figura 6 (Martins e Brito, 2011).

Segundo Martins e Brito (2011), em 1906, surgiu um dos primeiros veículos elétricos híbrido de configuração paralela, o Auto-Mixte, desenvolvido pelo alemão Henri Pieper. Nesta configuração, o motor elétrico e a combustão estão mecanicamente conectados e o motor elétrico pode ser alimentado pelas baterias e utilizado para arrancar o motor a combustão (que se encontra conectado às rodas mecanicamente) ou complementar a potência do motor a combustão. Ainda de acordo com o autor, grande parte dos conceitos de Pieper foram utilizados nos híbridos paralelos da atualidade, como o Toyota Prius e o Honda Insight.



Figura 6: Réplica funcional do híbrido série Lohner Porsche Semper Vivus
Fonte: Martins e Brito, 2011

Entre os anos de 1907 e 1939 a empresa americana Anderson Electric Car Company produziu o veículo Detroit Electric, considerado até os dias de hoje, o veículo elétrico mais vendido na história. O modelo Detroit Electric, conforme ilustra a Figura 7, utilizava as inovadoras baterias de níquel-ferro produzidas por Thomas Edison e chegou a cerca de 35.000 unidades vendidas. Destaque para seus proprietários, que dentre eles estavam John D. Rockefeller Jr. (filho do magnata do petróleo John D. Rockefeller) e Clara Jane Bryant (esposa de Henry Ford, grande impulsionador do veículo a combustão) (Martins e Brito, 2011).

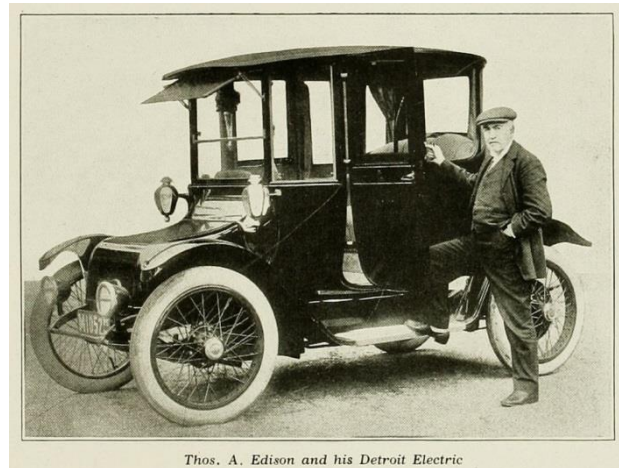


Figura 7: Thomas Edison ao lado do Detroit Electric
Fonte: Martins e Brito, 2011

2.1.3. O declínio da mobilidade elétrica

Em 1910, o mesmo inventor da partida a manivela - Charles Kettering - desenvolveu a tecnologia *self-starter* (autoarranque ou partida elétrica). A partida elétrica consistia de um motor elétrico que conseguia girar o motor e dar partida no automóvel e depois que o motor funcionava, o pequeno motor elétrico passava a funcionar como um gerador, mantendo a bateria de 6 volts carregada (Perracini, 1990).

Na partida elétrica, o motorista apertava um botão e uma faísca gerada na câmara de combustão dava a partida no carro. Com a possibilidade de realimentação, a bateria passou a ser utilizada tanto na alimentação das velas que geravam as faíscas como nos demais equipamentos elétricos, dentre eles a buzina e sistema elétrico de iluminação (Perracini, 1990).

O primeiro automóvel a utilizar a partida elétrica foi o veículo Cadillac 1912, produzido pela General Motors (GM). Noce (2009) considera que esse veículo a combustão marcou o início do declínio do carro elétrico. A partir deste modelo, o botão de partida se popularizou, se estendendo gradativamente a todos os outros fabricantes de veículos a combustão. Quando as chaves automotivas surgiram, por questões de segurança, ainda era preciso pressionar o botão da partida para ligar o veículo. A chave de ignição com partida

combinada só foi desenvolvida em 1948, pela empresa Chrysler, onde no fim do curso da chave, ao se forçar mais um pouco para frente, era possível acionar o botão do motor de arranque (Autoentusiastas, 2014).

Em 1908, o empresário americano Henry Ford iniciou a produção do veículo a combustão Ford T. Na produção deste veículo foi adotada a primeira linha de montagem automobilística do mundo, com linha de montagem e produção em série. A cor da carroceria foi padronizada, a partir de 1913, para a cor preta, por ser a única tinta de secagem rápida no mercado. Segundo Perracini (1990), o Ford T custava apenas 850 dólares e a produção em massa fez com que o veículo fosse muito mais acessível aos consumidores.

O declínio dos veículos elétricos foi intensificado a partir de 1920, com a descoberta de grandes jazidas de petróleo no estado americano do Texas, onde o petróleo era extraído a baixas profundidades. Neste período, conhecido como “febre do ouro negro”, grandes companhias petrolíferas americanas tinham o poder de ajuste do preço do petróleo e optaram pela diminuição gradual do preço, ficando abaixo do custo da eletricidade na época (Noce, 2009).

Barassa (2015) destaca que no período compreendido entre 1920 e 1973 houve o desaparecimento do veículo elétrico. Produtores e fabricantes, por influência da tecnologia dominante do motor a combustão, descartaram as demais possibilidades tecnológicas, adotando a exclusão das tecnologias concorrentes. O desaparecimento só não foi total porque ocorreram pontuais iniciativas de produção e comercialização de veículos elétricos.

Houve uma retomada do veículo elétrico durante a Segunda Guerra Mundial (1939-1945), devido ao racionamento e até falta generalizada de gasolina na França ocupada. Neste período alguns projetos de veículos elétricos surgiram em maior número no país, dentre eles o Mildé Krieger, Paris-Rhône, CGE Tudor e STELA (Martins e Brito, 2011). Segundo Noce (2009), nesse período os veículos elétricos se concentraram nos meios de transporte de massa como ônibus, bondes, trens e na movimentação de cargas como empilhadeiras e máquinas de tração. No pós-guerra, a necessidade de veículos elétricos se extinguiu devido à retomada do baixo custo da gasolina no mercado e novamente o desenvolvimento tecnológico da indústria automobilística se concentrou nos veículos com motores a combustão.

2.1.4. A retomada do veículo elétrico

Para alguns autores, dentre eles Barassa (2015) e Martins e Brito (2011), o ano de 1973 é o marco da retomada das pesquisas e produção do veículo elétrico devido à crise do petróleo. O aumento do consumo da gasolina impulsionou a busca por mais jazidas de petróleo, que foram encontradas em grande número no Oriente Médio. A abundância de petróleo no mercado provocou uma drástica redução dos preços do petróleo, o que fez com que Arábia Saudita, Kuwait, Irã, Iraque e Venezuela formassem a OPEP (Organização dos Países Exportadores de Petróleo), em 1960, com objetivo de restringir a oferta de petróleo no mercado internacional (Pereira, 2008).

Egito e Síria, em 1973, invadiram Israel com objetivo de retomar as regiões de Golã, Sinai e Cisjordânia. Os israelenses venceram a batalha com o apoio dos Estados Unidos (EUA). A OPEP, como resposta imediata, determinou a suspensão da venda do petróleo aos países que ajudaram Israel (Pereira, 2008).

A crise do petróleo de 1973 causou um enorme impacto econômico mundial e vários países se preocuparam em diminuir a dependência do petróleo no setor de transporte e, a partir deste ano, um grupo de países, dentre eles Estados Unidos, Japão e França, iniciaram ações em prol da retomada da produção de automóveis elétricos. O Japão assumiu a condução do processo de desenvolvimento e foi um dos primeiros países a fornecer financiamento público a novos projetos que viriam a ser comercializados. Barassa (2015) destaca que nenhuma das ações de incentivo resultou na produção em massa dos veículos elétricos no século XX.

Após a crise do petróleo de 1973 surgiram as primeiras conferências ambientais. Na década de 1980 surgiu o conceito de “desenvolvimento sustentável” que visa o uso dos recursos naturais de forma a atender as necessidades atuais sem comprometer o acesso a estes recursos às futuras gerações (Pereira, 2008). Vários países têm desenvolvido tecnologias de combustíveis que diversifique a matriz energética, especialmente, para o setor de transportes (Noce, 2009).

Martins e Brito (2011) destaca que nos dias atuais têm ressurgido novos modelos de veículos elétricos no mercado automotivo. Alguns autores, como Noce (2009), destacam que a

retomada dos veículos elétricos ocorre devido à necessidade de se reduzir os níveis de emissão de dióxido de carbono que aumentam o efeito estufa, causam aquecimento global e desequilíbrio de vários ecossistemas.

Pereira (2008) questiona se a retomada dos veículos elétricos seria realmente por questões ambientais ou por questões estratégicas. O autor destaca que devido ao alerta iminente do fim das reservas petrolíferas em um curto espaço de tempo, esta preocupação em diversificar a matriz energética seria mais por causa da substituição do petróleo em tempo hábil do que uma preocupação ambiental.

2.2. A trajetória do automóvel no Brasil

A Figura 8 apresenta o primeiro automóvel no Brasil, o Peugeot Type 15, adquirido por Alberto Santos Dumont, na época, futuro pai da aviação. O veículo a combustão desembarcou no porto de Santos em 25 de novembro de 1891, após Santos Dumont conhecer o automóvel em Paris, na época em que surgiram os primeiros automóveis (Perracini, 1990). Santos Dumont utilizou motores automotivos em alguns de seus dirigíveis construídos em Paris. Devido a isso há um questionamento sobre o quanto este automóvel pode ter contribuído para o surgimento da aviação (PSA Groupe, 2016).



Figura 8: Peugeot trazido da França por Santos Dumont
Fonte: PSA Groupe

Perracini (1990) destaca que em pouco tempo o automóvel se tornou uma paixão nacional e rapidamente destruiu a promissora carreira das ferrovias. Na década de 1920, o Brasil já era um importante mercado consumidor de automóveis e algumas montadoras acabaram se instalando no país. A primeira montadora a se instalar no país foi a Ford, em 1919, na cidade de São Paulo, com a produção do veículo a combustão Ford T. A GM também se instalou na cidade de São Paulo, em 1925, como Companhia Geral de Motores do Brasil S.A (Carro Antigo, 2016). Porém tudo era importado; do carro à gasolina, do motor à válvula da câmara de ar (Perracini, 1990).

Na época da Segunda Guerra Mundial o Brasil possuía cerca de 200 mil veículos entre automóveis, caminhões e utilitários, todos fabricados com peças importadas. Com a interrupção da produção europeia e todo o parque industrial americano voltado para a guerra, o país foi ficando sem peças de reposição e sem combustível. A escassez de combustível fez surgir na indústria os gasogênios, dispositivos que geram gás pobre a partir da queima de matéria prima carbonizada, utilizado nos motores a combustão como substituto da gasolina conforme mostra a Figura 9. No Brasil, o gasogênio foi considerado o equipamento do “tempo de guerra” para a falta de gasolina da época (Carro Antigo, 2016).



Figura 9: Veículo movido a gasogênio
Fonte: Carro Antigo, 2016

Segundo Perracini (1990), o Brasil ganhou muito dinheiro durante a Segunda Guerra vendendo alimento e matéria prima para os Aliados, porém em pouco tempo gastou tudo e descobriu que não podia importar mais nada. Segundo o autor, a solução encontrada foi produzir seus próprios veículos, estimulando a fabricação de automóveis nacionais. O presidente Juscelino Kubitschek (JK) que governou o país de 1956 a 1961, tinha como

programa de governo o Plano de Metas “50 anos em 5”, que se baseava em 50 anos de progresso em 5 anos de realizações. O Plano de Metas incluía incentivos ao setor privado para que metas de desenvolvimento fossem alcançadas em cinco setores da economia: Energia, Transporte, Indústrias de Base, Educação e Alimentação. Com o incentivo iniciou-se a implantação da indústria automobilística nacional. A partir de 1957 iniciou-se no Brasil uma efetiva produção automotiva, com a instalação de diversas montadoras de automóveis, caminhões e utilitários, dentre elas: Mercedes Benz, Simca, Toyota, Volkswagen e Vemag (Carro Antigo, 2016).

A Figura 10 ilustra o Aero Willys 2600, um veículo a combustão considerado o primeiro carro projetado e fabricado totalmente no Brasil e o primeiro automóvel concebido na América Latina. Foi lançado em 1963 e era considerado entre os mais velozes da época por atingir velocidade de 140 km/h (Carro Antigo, 2016).



Figura 10: Aero Willys 2600
Fonte: Carro Antigo, 2016

Com a crise do petróleo, em 1973, ressurgiram vários projetos de veículos elétricos pelo mundo. No Brasil foi desenvolvido o primeiro veículo elétrico, o Gurgel Itaipu, ilustrado na Figura 11, projetado pelo engenheiro brasileiro João Gurgel e apresentado no Salão do Automóvel de São Paulo em 1974. O Gurgel Itaipu, alusão à maior usina hidrelétrica do país, era um minicarro destinado ao uso urbano, com capacidade para duas pessoas. Conforme Tabela 1, suas baterias recarregáveis de chumbo-ácido pesavam 320 kg, possuía autonomia de 60 km com apenas uma recarga e podia ser carregado como qualquer eletrodoméstico (Gurgel 800, 2016). Segundo Noce (2009), o baixo desempenho associado à baixa autonomia das baterias fez com que o projeto não obtivesse sucesso para seguir adiante.



Figura 11: Gurgel Itaipu
Fonte: Noce, 2009

Tabela 1: Especificações técnicas do Gurgel Itaipu elétrico

Veículo	Gurgel Itaipu - 1974
Peso do veículo	780 kg
Velocidade máxima	60 km/h
Motor elétrico	3000 W / 4,2 HP
Tipo da bateria	Chumbo-ácido
Peso da bateria	320 kg
Capacidade nominal	84 Ah
Tensão	120 V
Número de células	10 células de 12 V cada (ligadas em série)
Autonomia	50 a 60 km
Tempo de recarga 0% - 100%	10 horas
Tempo de recarga 50% - 100%	2 horas

Fonte: Elaboração própria a partir dos dados de Gurgel 800 (2016).

A crise do petróleo de 1973 provocou em todo o mundo a necessidade de se adotar novas alternativas energéticas. No Brasil, o governo da época vislumbrou o uso do álcool como substituto da gasolina que poderia vendido com as mesmas características do modelo da gasolina, utilizando inclusive da mesma rede de distribuição. O governo do presidente Ernesto Geisel instituiu o programa Proálcool, no Decreto n.º 76.593 de 14 nov. 1975. O programa Proálcool provocou no Brasil a difusão dos carros a álcool, que chegou a superar a venda dos veículos com motor a gasolina na década de 1980 (Figueiredo, 2006).

No Brasil, em 1978 foi lançado o primeiro automóvel a álcool produzido no país, o modelo Fiat 147 na recém-instalada fábrica de Betim, em Minas Gerais (Carro Antigo, 2016).

A adoção maciça dos veículos a álcool ocorreu em 1983, porém em 1985 houve uma nova retomada do crescimento das vendas dos veículos a gasolina, resultado da manipulação de preços dos combustíveis realizada pelo governo (Figueiredo, 2006).

De acordo com Noce (2009), o programa Proálcool inviabilizou a produção de veículos elétricos no país, momento este que seria oportuno devido à crise do petróleo. A Conferência Eco 92, realizada no Rio de Janeiro, retomou a discussão sobre a adoção de veículos elétricos como proposta de mobilidade sustentável, porém não houve no país uma expressiva ação em relação ao carro elétrico (Baran, 2012). Anos mais tarde, em 2003, o Brasil se tornou pioneiro em lançar no mercado veículos bicomcombustível (*flexible fuel*), mais conhecido como “flex”, que permite que o motor funcione com álcool ou gasolina, em qualquer proporção de mistura (Figueiredo, 2006).

O veículo Gol Total Flex da Volkswagen (VW) foi o primeiro automóvel no Brasil com motor “flex”. A partir de seu lançamento, todas as montadoras do país adotaram esta tecnologia e atualmente mais de 90% dos automóveis em circulação no Brasil possuem motor “flex” (Calmon, 2013).

No Brasil, a ideia inicial era utilizar o gás natural veicular (GNV) como substituto do óleo diesel utilizado na frota de veículos pesados (caminhões, micro-ônibus e uma parcela de utilitários leves). Devido à pequena diferença entre o preço do óleo diesel e o GNV tornando a conversão de frotas inviável, o governo em 12/01/1996 publicou o Decreto n.º 1.787 que dispõe sobre a utilização de gás natural para fins automotivos, liberando o uso do GNV como substituto da gasolina e do álcool para veículos leves particulares, que passaram a ser adaptados em oficinas credenciadas (Pelliza, 2003).

A busca pela diversificação de combustíveis levou a Chevrolet a lançar no mercado nacional, em 2004, o veículo Astra Multipower, movido a gasolina, álcool e também a GNV, se tornando o primeiro veículo tricombustível de fábrica do país (Notícias Automotivas, 2009). Após o lançamento do Astra Multipower outros veículos foram fabricados com o “kit gás”, como a Ford Ranger em 2006 e o Fiat Siena Tetrafuel em 2007 (Notícias Automotivas, 2009). Segundo Pelliza (2003) a insuficiente malha de distribuição e o alto investimento de instalação dificultam a disseminação do uso do GNV.

A fim de desenvolver um protótipo elétrico cuja utilização seja viável do ponto de vista técnico, econômico e ambiental, a hidrelétrica Itaipu Binacional assinou, em 2004, um acordo internacional de cooperação com a empresa suíça Kraftwerk Oberhasli (KWO) para o desenvolvimento e pesquisa de veículos movidos a energia elétrica. Este projeto, denominado Projeto Veículo Elétrico ou Projeto VE, transformou o Fiat Palio Weekend em um veículo elétrico a ser utilizado na frota da própria hidrelétrica. O Projeto VE tem por objetivo aperfeiçoar o veículo elétrico de modo a reduzir os custos de fabricação, para a produção em escala industrial, realizar pesquisas para elevar a autonomia da bateria e diminuir seu tempo de recarga. A Figura 12 ilustra o Fiat Palio Weekend elétrico que, de acordo com a Tabela 2, possui autonomia de 120 km e baterias que pesam 165 kg (Itaipu, 2016).



Figura 12: Fiat Palio Weekend Elétrico

Fonte: Itaipu, 2016

Tabela 2: Especificações técnicas do Fiat Palio Weekend Elétrico

Veículo	Fiat Palio Weekend Elétrico
Velocidade máxima	110 km/h
Tipo do motor	Elétrico Assíncrono Trifásico
Potência máxima	15 kW /20 cv
Tipo da bateria	Zebra (sódio-metal-cloreto)
Peso da bateria	165 kg
Capacidade nominal	76 Ah
Tensão	278 V
Autonomia	120 km
Tempo de recarga 0% - 100%	8 horas

Fonte: Elaboração própria a partir dos dados de Itaipu (2016).

Segundo divulgado pela Associação Brasileira de Veículos Elétricos (ABVE), o número de veículos elétricos no país vem crescendo de maneira gradual, por meio de contratos de empréstimos e parcerias entre montadoras com outras empresas, a maioria do setor energético. Porém todos os automóveis elétricos no país são importados e a grande maioria se encontra a serviço de empresas, como veículos de frota (ABVE, 2016).

Barassa (2015) destaca que há uma lacuna na política pública que estimule a produção de veículos elétricos no país. Há uma elevada carga de impostos que incide sobre o preço final dos veículos elétricos no país. Após amplo debate sobre o tema e como medida a inserir o Brasil em novas rotas tecnológicas, foi aprovada no dia 27/10/2015 a Resolução da Câmara do Comércio Exterior nº 97/2015 que reduz de 35% para zero a alíquota do Imposto de Importação para automóveis movidos à eletricidade e a células de combustível, desde que o mesmo tenha autonomia de 80 km com apenas uma carga de bateria (Auto Esporte, 2015).

Outra forma de incentivo tem sido aplicada por parte de alguns estados brasileiros, que tem adotado alíquota diferenciada ou até mesmo isenção do Imposto sobre Propriedade de Veículos Automotores (IPVA). A isenção do IPVA é dada nos estados Piauí, Maranhão, Ceará, Sergipe, Rio Grande do Sul, Rio Grande do Norte e Pernambuco. Em São Paulo, Rio de Janeiro e Mato Grosso, os veículos elétricos possuem desconto de 50% no IPVA. Na cidade de São Paulo, como incentivo ao uso de veículos elétricos, foi aprovado o Decreto n.º 15.997/14 que regulamenta que veículos elétricos e híbridos, emplacados na cidade, estão isentos do rodízio municipal (Auto Esporte, 2015).

A Tabela 3 apresenta os veículos elétricos e híbridos comercializados no Brasil, para o consumidor comum. O BMW i3, ilustrado na Figura 13, é o único veículo elétrico comercializado no país para pessoas físicas, com autonomia de 160 km e três horas para uma recarga completa, vendido no país por R\$ 200 mil (Auto Esporte, 2015). Os outros carros elétricos presente no país são oferecidos apenas através de parcerias com empresas privadas, estatais e frotistas (ABVE, 2016).

Tabela 3: Veículos híbridos e elétricos comercializados no Brasil

Híbrido	Elétrico
Ford Fusion	BMW i3
Toyota Prius	
Lexus CT200	
Mitsubishi Outlander PHEV	
BMW i8	

Fonte: Elaboração própria a partir de dados do Auto Esporte (2015)

**Figura 13: Veículo elétrico BMW i3**

Fonte: Auto Esporte, 2016

Segundo divulgado por Oliveira (2016), para promover a mobilidade elétrica é necessário que se tenha postos de recarga a cada 100 km, já que a autonomia destes veículos se situa na faixa de 130 km a 180 km. Ainda segundo Oliveira (2016), a Associação Brasileira de Veículo Elétrico (ABVE) e a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) estão estudando a regulamentação do fornecimento e a regulação da cobrança da recarga, de forma que contribua para o desenvolvimento e proliferação destes postos.

Trigueiro (2013) salienta que uma frota volumosa de veículos elétricos poderiam causar impactos sobre o sistema de distribuição de energia, visto que seria difícil fornecer energia para a recarga destes automóveis nos horários de maior consumo (horário de ponta). Seria necessário estabelecer tarifas diferenciadas para estimular a recarga dos veículos fora do horário de ponta e desenvolver tecnologias que controlem isso.

2.3. Veículo elétrico no cenário atual

De acordo com Martins e Brito (2011), os problemas ambientais e a evolução tecnológica dos motores elétricos fizeram com que a mobilidade elétrica ressurgisse no século XXI, em especial, porque os automóveis passaram a ser vistos como uma das principais fontes de poluição atmosférica.

O órgão americano Conselho de Qualidade do ar da Califórnia (CARB - *California Air Resources Board*), iniciou em 1990 o programa Veículo de Emissão Zero (ZEV - *Zero Emission Vehicle*). O programa visa promover o uso de veículos elétricos, obrigando as montadoras, que fornecem veículos para a Califórnia, que também forneçam veículos elétricos a seus consumidores. Caso alguma montadora não acatasse essa lei teria sua operação cancelada na Califórnia, considerado o estado mais rico do país. Esta legislação atraiu interesse de outros estados como Oregon, Massachussets, New Jersey, que adotaram medidas similares (Barassa, 2015).

A Figura 14 ilustra o veículo elétrico EV1, lançado em 1996 pela GM. Este veículo não chegou a ser vendido, apenas alugado aos clientes pelo valor de US\$ 500 /mês (Noce, 2009). O EV1 surgiu com as novas baterias de níquel metal hidreto (NiMH), possuía autonomia de 350 km e velocidade máxima de 129 km/h. Em 2003 a GM decidiu abandonar este projeto, recolhendo e destruindo todos os carros existentes, exceto os doados a museus e universidades, porém sem seus motores, de modo a nunca mais funcionarem. A razão apresentada foi o custo da rede de assistência e de peças de substituição que, por lei, seria necessário manter por 15 anos, caso o EV1 continuasse a circular. O episódio da eliminação do EV1 foi o tema do documentário “*Who killed the electric car?*” (“Quem matou o carro elétrico?”) produzido, em 2006, pela Sony Pictures (Martins e Brito, 2011).



Figura 14: Veículo elétrico GM EV1

Fonte: Noce, 2009

Na cidade japonesa de Kyoto, em 1997, foi assinado um tratado sobre a redução da emissão de gases que agravam o efeito estufa. Conhecido como Tratado de Kyoto, os países procuraram não mais substituir por completo os veículos a combustão, mas produzir veículos que contribuam para a redução dos níveis de poluição atmosférica e sonora. Neste mesmo ano a Toyota lançou, no mercado japonês, o veículo híbrido paralelo Prius (Noce, 2009).

A Honda lançou no mercado americano, em 1999, o híbrido paralelo Insight, que imediatamente se tornou um sucesso. Em 2000, a Toyota lançou o Prius no mercado americano, obtendo um sucesso muito maior do que o concorrente Insight. A partir destes dois lançamentos, novos modelos foram surgindo no mercado e os veículos elétricos e híbridos passaram a ter maior relevância no século XXI (Baran, 2012).

Os veículos elétricos híbridos foram os responsáveis pela retomada do segmento a nível global e segundo Barassa (2015), este comportamento aponta que a escolha desta configuração está relacionada a uma mudança gradual entre as tecnologias de propulsão na indústria automotiva. Baran (2012) destaca que apesar das tecnologias híbrida e elétrica não serem recentes, os veículos híbridos podem ser vistos como o passo intermediário entre a evolução dos automóveis a combustão e dos veículos elétricos.

A Figura 15 ilustra o Nissan Leaf, lançado em 2010, considerado um “elétrico puro” (Martins e Brito, 2011). Segundo Baran (2012), logo no lançamento do Leaf, a montadora Nissan adotou uma política de preços agressiva, com preço médio de US\$ 25 mil aos consumidores americanos (R\$ 90 mil). É atualmente o carro elétrico mais vendido no mundo. De acordo com a Tabela 4, o veículo possui baterias de íon de lítio (Li-íon) com autonomia de 173 km e velocidade máxima de 145 km/h. Na parte frontal do veículo se encontram dois

conectores, o conector SAE J1772 para carregamento lento em baixa potência e o conector CHAdeMO para carregamento rápido. No carregamento rápido as baterias levam 30 minutos para serem carregadas em 80% de carga (Nissan, 2016).



Figura 15: Nissan Leaf e detalhe dos conectores de carregamento rápido e lento
 Fonte: Martins e Brito, 2011

Tabela 4: Especificações técnicas do Nissan Leaf

Veículo	Nissan Leaf
Peso do veículo	1945 kg
Velocidade máxima	145 km/h
Motor elétrico	80 kW / 107 HP
Torque máximo	187 Lb-ft / 26 kgfm
Tipo da bateria	Bateria de Li-íon
Energia	30 kWh
Autonomia	107 milhas / 173 km
Tempo de recarga 0% - 100%	5,5 a 9,5 horas em 240 V 30 minutos em recarga rápida (até 80% de carga)

Fonte: Elaboração própria a partir dos dados de Nissan (2016).

Barassa (2015) salienta que, como resultado das recentes políticas de incentivo, a participação de veículos elétricos e híbridos tem aumentado no mercado automobilístico. Segundo o autor, a proporção destes veículos é irrelevante não sendo possível afirmar se, em algum dia, terão uma expressiva participação no mercado. Os potenciais compradores, interessados em veículos que utilizem combustíveis alternativos e causem baixo impacto ambiental, ainda se preocupam sobre o custo do automóvel, a confiabilidade da tecnologia e o

tempo de recarga das baterias. De acordo com o autor, apesar das dúvidas dos consumidores, as vendas anuais dos veículos elétricos e híbridos têm crescido continuamente.

O crescimento dos híbridos sobre os elétricos pode estar relacionado ao posicionamento de Baran (2012), que acredita que os veículos híbridos representam o passo intermediário entre a evolução dos automóveis a combustão e os elétricos.

De acordo com dados divulgados pelo Instituto de Estudos de Transporte (ITS – *Institute of Transportation Studies*) da Universidade da Califórnia, apenas 3,8% dos domicílios possuem como seu único automóvel, um veículo elétrico. A tendência é que proprietários de veículos elétricos tenham um automóvel elétrico e outro a combustão em sua garagem (ITS, 2013).

3. PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DO VEÍCULO ELÉTRICO

Neste capítulo são apresentadas as principais características do veículo elétrico, dentre elas a classificação dada aos veículos elétricos e a eficiência dos mesmos quando comparado com veículos a combustão. Uma introdução teórica é apresentada a respeito da combinação da bateria com ultracapacitores e o uso da frenagem regenerativa, objetivando estender a autonomia do veículo e da vida útil da bateria. Os modos de carregamento permitidos também são apresentados no presente capítulo.

3.1. Classificação dos veículos elétricos

De acordo com ABVE (2016), veículo elétrico é um veículo automotor que utiliza pelo menos um motor elétrico para acionamento das rodas e possua como características a alta eficiência energética e o baixo ou nulo índice de emissões de poluentes e ruídos.

Diversos modelos de veículos elétricos têm sido produzidos e comercializados, e estes são classificados pela “fonte” da energia elétrica que alimenta o(s) motor (es) elétrico(s) e pelo arranjo dos componentes do sistema de tração elétrica. A Figura 16 apresenta a classificação adotada por Barassa (2015) e ABVE (2016).

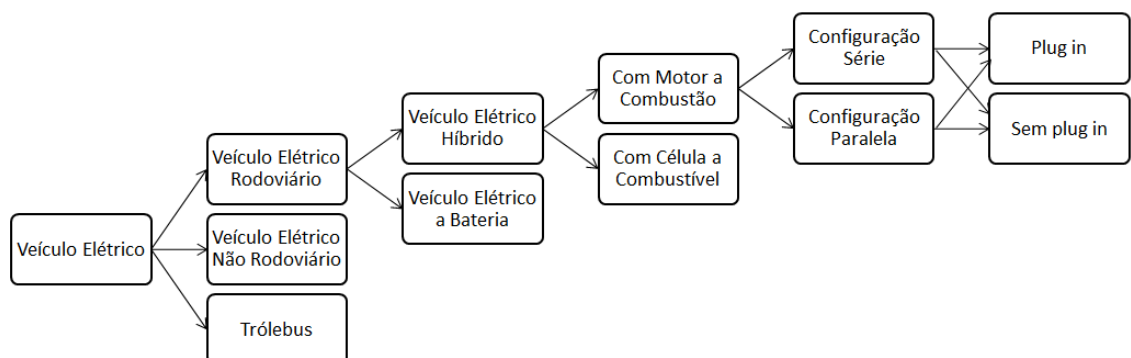


Figura 16: Grupos de veículos elétricos

Fonte: Elaboração própria a partir de Barassa (2015) e ABVE (2016)

Barassa (2015) destaca que há outras configurações possíveis para os veículos elétricos, porém foram muito pouco utilizadas quando se analisa a história dos veículos elétricos já produzidos até os dias de hoje.

Considera-se veículo elétrico não rodoviário, os veículos que não utilizam rodovias e estradas para seu deslocamento como empilhadeiras e embarcações elétricas (Barassa, 2015). Segundo a ABVE (2016), são considerados veículos não rodoviários aqueles que rodam sobre trilhos, e não sobre pneus, como locomotivas e trens, porém as aeronaves também se encaixam na classificação de veículos não rodoviários.

O trólebus é um veículo elétrico rodoviário, destinado ao transporte de passageiros, que fica ligado continuamente à rede elétrica quando em movimento e por isso é desprovido de baterias (Barassa, 2015). Nesta classificação também se enquadram os trens de superfície e os metrô (Noce, 2009).

O veículo elétrico híbrido (VEH) ou veículo híbrido elétrico (VHE) é caracterizado por possuir fontes de energia distintas para a sua propulsão, sendo uma delas a eletricidade. A classificação de veículo elétrico híbrido possui ainda duas divisões; com motor a combustão interna e com célula a combustível (Chan, 2002).

O veículo elétrico híbrido à célula a combustível (VEHCC) ou *Fuel Cell* (FC) utiliza células de combustível a hidrogênio para gerar eletricidade utilizada na propulsão do veículo. Através da reação química entre o hidrogênio e o oxigênio é produzido água, calor e corrente elétrica, sem a emissão de poluentes (Chan, 2002). Segundo Martins e Brito (2011), veículos com esta tecnologia apresentam autonomia comparável aos veículos a combustão interna, popularmente conhecidos como MCI (Motor a Combustão Interna) ou ICE (*Internal Combustion Engine*). A célula de combustível a hidrogênio é uma tecnologia cara, pouco robusta, de vida curta e elevado rendimento, porém as desvantagens oferecidas fazem com que esta tecnologia ainda não esteja madura para o mercado.

No VEH, a energia pode ser obtida por meio de combustíveis líquidos (álcool, gasolina e diesel) e gasosos (gás natural). O modo de instalação do motor a combustão irá determinar a configuração do veículo, que pode ser de configuração série ou paralela (Chan, 2002).

O VEH série possui o motor a combustão interna sem ligação mecânica às rodas, ligado apenas a um gerador que produz eletricidade para baterias. Esta configuração geralmente elimina a necessidade de recarga junto à rede elétrica sendo, portanto, caracterizado como “*sem plug-in*” (Chan, 2002).

No VEH paralelo (VEHP ou VHEP), conforme Chan (2002), tanto o motor a combustão quanto o motor elétrico podem acionar as rodas por meio de acoplamentos mecânicos simultâneos. O motor elétrico pode fornecer potência extra ao motor a combustão ou pode funcionar sozinho.

A SAE, de acordo com Martins e Brito (2011) considera veículos híbridos apenas os que possuem configuração paralela, onde motor a combustão e elétrico podem acionar diretamente as rodas. Os híbridos de configuração série são denominados “elétricos de autonomia estendida”

Tanto o VEH série quanto o VEH paralelo podem apresentar a configuração *plug-in* onde os veículos têm a possibilidade de carregamento junto à rede elétrica (Barassa, 2015). Baran (2012) salienta que, além da configuração série e paralela para veículo elétrico híbrido, há também a configuração mista, onde estão presentes no mesmo veículo dois motores elétricos, um que atua em série e outro que atua em paralelo com o MCI, porém esta tecnologia ainda não é muito utilizada.

O veículo elétrico a bateria (VEB) ou veículo elétrico (VE) é o então considerado “elétrico puro”, onde a propulsão ocorre exclusivamente por meio de um motor elétrico alimentado por baterias. A recarga das baterias ocorre por meio da rede elétrica sendo, portanto, sempre de configuração *plug-in* (Chan, 2002).

As principais configurações adotadas no mercado automobilístico são apresentadas na Figura 17. Barassa (2015) destaca que cada configuração disponível de veículo elétrico apresenta vantagens e desvantagens em relação aos demais tipos. Dentre as configurações disponíveis no mercado ainda não é possível afirmar que há uma configuração ótima ou um modelo superior, já que todas estas configurações ainda passam por um processo de consolidação no mercado mundial.

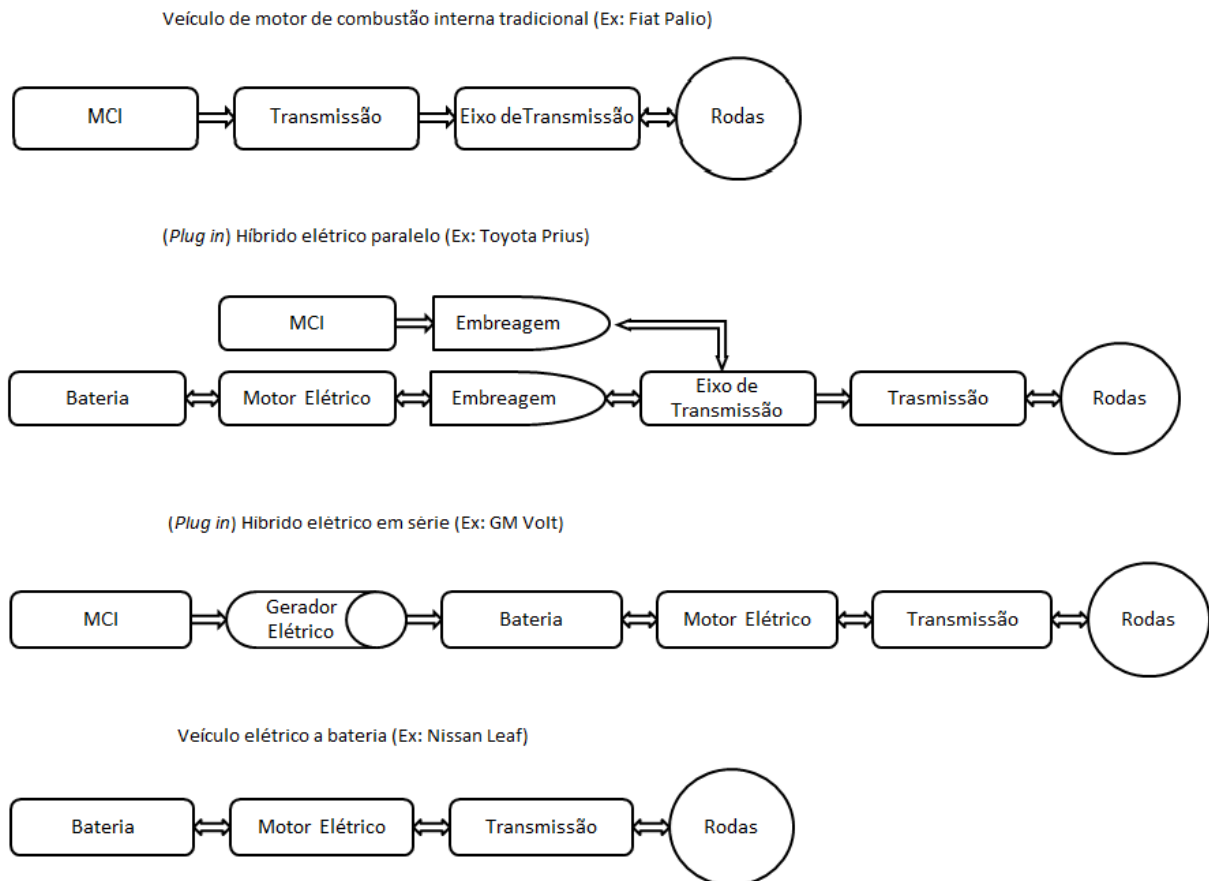


Figura 17: Principais configurações dos automóveis no mercado.

Fonte: Baran, 2015

O aumento das patentes, de acordo com Barassa (2015), revela um aumento no desenvolvimento tecnológico indicando possíveis rotas, uma vez que não é clara a tecnologia predominante. EUA e Japão são os maiores patenteadores atualmente e o maior número de patentes se concentram no desenvolvimento de motores elétricos e baterias, tecnologias consideradas fundamentais para os VEs.

3.2. Veículos elétricos vs. Veículos a combustão

Os VEs, conforme MacLean e Lave (2002) explicam, são de 30% a 40% mais eficientes que os veículos com MCI, tanto do ponto de vista energético quanto ambiental. Nos veículos a combustão, cerca de 60% da energia do combustível é perdida no motor, devido ao

atrito das partes móveis, perdas aerodinâmicas relativas ao bombeamento do ar pelo motor e na forma de calor.

O veículo MCI apresenta maior eficiência em alta rotação (até 28%), porém em baixa rotação é relativamente ineficiente (de 10% a 5%). Sua eficiência média é considerada em torno de 15%. Como a maioria dos automóveis encontra-se no trajeto urbano, onde seus motores a combustão quase sempre funcionam em baixa rotação, conclui-se que seus motores estão, na maior parte do tempo, trabalhando com baixa eficiência (MacLean e Lave, 2002).

O motor elétrico que traciona o VE, em sua maioria, é do tipo CA trifásico e não possui limite mínimo de rotação como um MCI. Esta condição elimina a necessidade da transmissão de múltiplas velocidades. Com a eliminação da transmissão de múltiplas velocidades elimina-se também o acoplamento entre o motor e a transmissão de múltiplas velocidades, denominado embreagem. A eliminação da embreagem proporciona ao veículo uma manutenção mais simplificada, com diminuição de componentes de atrito e menor necessidade de lubrificação (Oliveira, 2005).

O motor elétrico de um VE tem por característica entregar máximo torque na partida, que se mantém quase constante, até atingir alta rotação (Figura 18). O motor elétrico fornece alto torque em baixas velocidades e baixo torque em altas velocidades. Em um veículo MCI, a potência entregue pelo motor varia de acordo com a velocidade; quanto menor a velocidade, maior o torque. É o caso da primeira marcha, utilizada quando o veículo encontra-se parado e se faz necessário, em baixa velocidade, grande força para colocar o veículo em movimento. Em uma marcha mais alta, quando o veículo se encontra em alta velocidade, é entregue pelo MCI mais velocidade com menor torque. É possível verificar que o motor elétrico, quando comparado ao MCI, consegue entregar maior torque a uma mesma velocidade (Oliveira, 2005).

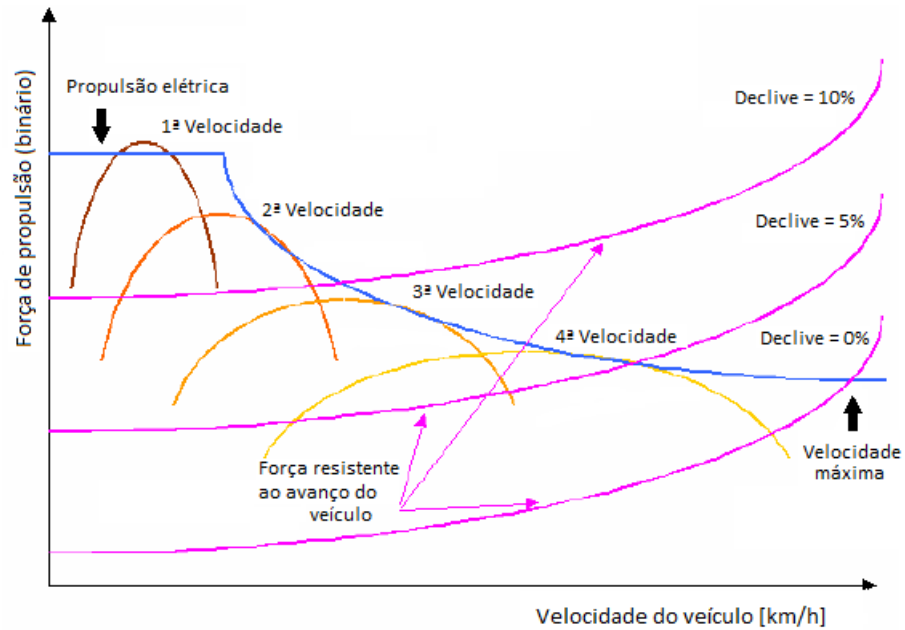


Figura 18: Variação do torque com a velocidade para MCI e motor elétrico
 Fonte: Oliveira, 2005

Em relação ao desempenho energético, que é a razão entre a distância percorrida por um veículo e a quantidade de energia consumida durante o trajeto, os veículos elétricos superam com vantagem os veículos a combustão. IEA (2011) considera o desempenho energético médio de um veículo MCI, da categoria de veículos leves utilizando gasolina C (gasolina mais 20% de etanol), de 12,5 km/L (8 L/100 km). O desempenho médio do veículo elétrico é considerado de 5,0 km/kWh (0,2 kWh/km), o que corresponde a 44,5 km/L, de acordo com os dados de conversão apresentado na Tabela 5 (U.S. Department of Energy, 2014).

Tabela 5: Comparação de combustíveis

Gasolina (gal)	Eletricidade (kWh)
	33,7 kWh possui 100% da energia de 1 galão de gasolina. (1 galão = 3,7854 litros)

Fonte: Elaboração própria a partir dos dados de U.S. Department of Energy (2014).

Uma das maiores vantagens do VE está relacionada às questões ambientais. É considerado por muitos como ZEV, por não produzir poluição sonora e nem emissão de dióxido de carbono (CO₂) no local onde se dirige. Porém, a baixa autonomia e o tempo de recarga ainda são as maiores desvantagens do VE.

O veículo com MCI, em sua maioria, produz poluição mesmo parado porque seu motor permanece em funcionamento. Visando reduzir a emissão de CO₂, uma nova tecnologia tem sido aplicada aos veículos a combustão, conhecida como *Start & Stop* (S&S). Com esta tecnologia, o MCI é desligado quando o veículo se encontra parado no trânsito por alguns segundos. Quando o pedal do freio é aliviado, o motor é novamente ligado. Esta nova tecnologia tem por objetivo proporcionar a redução da emissão de poluentes e a economia de combustível. No Brasil o S&S já se encontra presente em alguns veículos nacionais, como no Novo Uno 2015 da Fiat, Golf Variant da Volkswagen e Cruze 2017 da Chevrolet.

MacLean e Lave (2002) consideram que a comparação entre veículo elétrico e veículo a combustão deva ser mais abrangente. A análise deve considerar a extração da matéria prima, a produção do combustível, requisitos de infraestrutura e o ciclo do fim da vida útil do veículo visto que ambos os tipos de propulsão apresentam vantagens e desvantagens.

Uma análise realizada por Noce (2009) conclui que um VE abastecido nos EUA apresenta nível de emissão de CO₂ semelhante a um veículo à combustão, para a mesma distância percorrida, uma vez que parte da energia elétrica no país é gerada por termelétricas, grandes emissoras de CO₂. O autor sugere que no Brasil, o VE seja estimulado a recarregar no período de carga leve do sistema elétrico (durante a madrugada) para que utilize somente a parcela de energia gerada pelas hidrelétricas, sem a necessidade da geração térmica.

Há a preocupação com o descarte da bateria do VE. Ferreira (2004) sugere que as baterias sejam recicladas ou reaproveitadas após o fim de sua vida útil em centrais de telecomunicações onde, em geral, são necessárias baixas correntes por longos períodos de tempo.

3.3. Baterias e ultracapacitores

Nesta seção são apresentados dados mais técnicos referente aos tipos de baterias utilizadas nos veículos elétricos, a energia de armazenamento e energia de operação das mesmas. Também são apresentados os ultracapacitores que, utilizados em conjunto com a bateria, permitem aumentar a performance do veículo elétrico.

3.3.1. Baterias nos veículos elétricos

De acordo com Martins e Brito (2011), se nos veículos convencionais nos preocupamos somente com sua motorização, nos esquecendo do depósito de combustível, em um VE, o motor elétrico e a bateria são igualmente importantes e a bateria passa a ter um papel essencial que chega a influenciar até no design do automóvel.

A bateria é, atualmente, a grande limitação tecnológica e econômica do VE. Mesmo as mais avançadas apresentam limitação tecnológica por ainda serem extremamente volumosas e pesadas. A limitação econômica é devido ao seu custo que representa uma parcela significativa no preço final do automóvel elétrico (Martins e Brito, 2011).

As primeiras baterias utilizadas nos automóveis elétricos eram as de chumbo-ácido. A partir dos anos 90, a bateria de NiMH passou a ser utilizada em larga escala, por possuir maior vida útil e maior nível de armazenamento que as baterias anteriormente utilizadas. Na década de 90 surgiram as primeiras baterias de Li-íon que se tornaram a grande aposta da indústria automotiva para uso nos VEs. Apesar das baterias de chumbo-ácido serem as mais produzidas no mundo, as baterias Li-íon e NiMH, atualmente, são as mais utilizadas nos VEs (Husain, 2003).

As baterias são classificadas em dois grandes grupos que também se subdividem em relação ao tipo de eletrólito utilizado (Noce, 2009).

- Baterias Primárias: São baterias que não podem ser recarregadas, sendo irreversível seu processo químico de geração de energia;

- **Baterias Secundárias:** São baterias que podem ser recarregadas em um determinado número de ciclos quando atende aos requisitos de temperatura, corrente e tensão de recarga;
- **Baterias de Eletrólito Livre:** São baterias onde o eletrólito, solução aquosa de ácido sulfúrico, encontra-se inundando as placas de chumbo. Neste tipo de bateria pode ser necessária a reposição da fração aquosa do eletrólito perdido pela evaporação. Este tipo de bateria possui limitação quanto à posição de operação;
- **Baterias de Eletrólito Retido:** São baterias onde o eletrólito, mesmo líquido, encontra-se retido em uma fibra de vidro altamente absorvente ou em um gel. Este tipo de bateria pode ser fabricado em diversos tamanhos e formatos e podem permanecer em qualquer posição.

As baterias Li-íon são classificadas como baterias secundárias de eletrólito retido. De acordo com Husain (2003), apresentam vantagens em termos de energia e potência por kg, pois o lítio é o metal com maior potencial de redução (3,045 V) e menor massa atômica (6,94 u) dentre os metais já utilizados. Devido a isso, possuem maior densidade de energia, isto é, mesma autonomia com menor volume e peso, além de permitirem maior número de ciclos de carga e descarga (Martins e Brito, 2011).

Considerada como a grande aposta da indústria automotiva, as baterias de Li-íon não possuem materiais tóxicos (chumbo, cádmio e mercúrio) e o lítio é uma matéria prima barata (Baran, 2012). As células de Li-íon operam com tensões nominais de 3,6 V, o que equivale a três células de NiMH de 1,2 V. Como ilustra a Figura 19, as baterias de Li-íon possuem alta densidade energética e alta densidade de potência dentre as demais baterias do mercado. Além disso, apresentam bom desempenho em altas temperaturas (Husain, 2003).

De acordo com Noce (2009), a escassez de lítio no mundo tem alimentado argumentos contrários à proliferação de veículos elétricos que afirmam que as reservas de lítio não são suficientes para atender à demanda esperada. Baran (2012) destaca que a reciclagem do lítio, que é um metal, e o aumento da eficiência energética dos veículos são fatores fundamentais para não restringir o crescimento mundial da produção dos VEs.

A bateria de sódio-metal-cloreto (Na-NaCl_2), comercialmente conhecida como bateria ZEBRA (*Zeolite Battery Research Africa Project*), tem sido aplicada em VEs. Esta bateria utiliza o sal fundido como eletrólito, que a temperatura ambiente se encontra no estado sólido, sendo necessário o aquecimento da bateria a uma temperatura de 250 a 300°C. De acordo com Husain (2003) apresenta a vantagem de ser constituída de matéria prima extremamente barata e o inconveniente da alta temperatura para seu funcionamento.

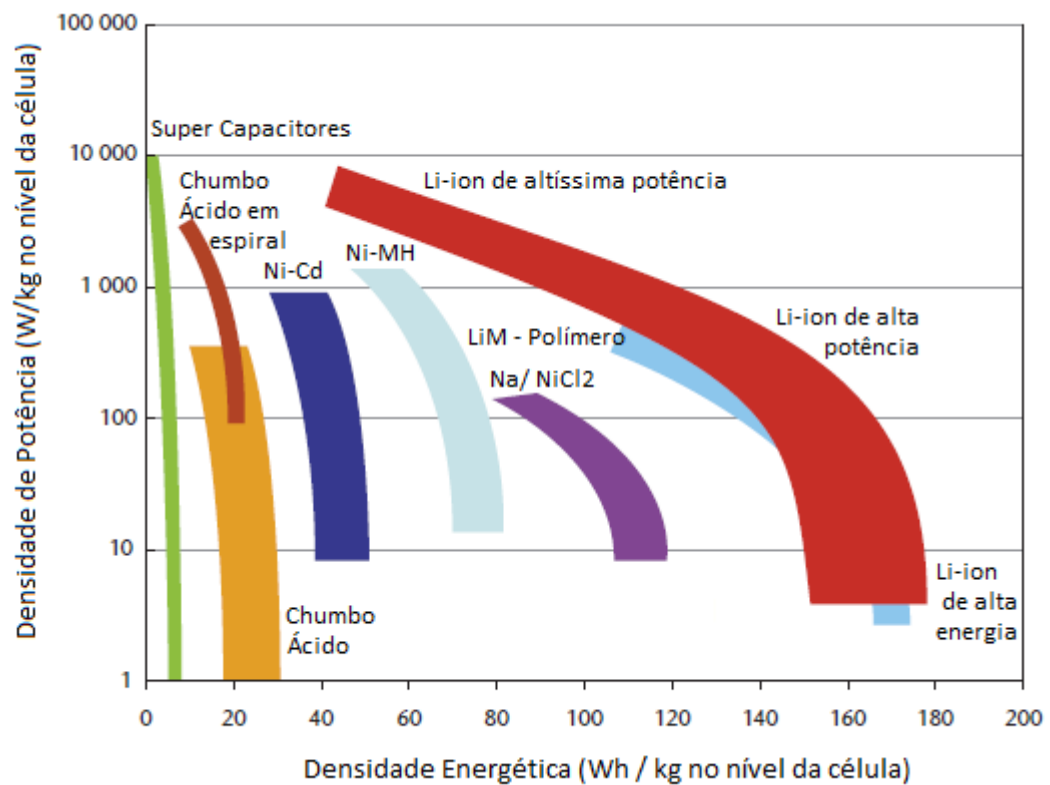


Figura 19: Densidade Energética e Densidade de Potência de diferentes tipos de baterias

Fonte: IEA, 2011

3.3.2. Energia de armazenamento das baterias

A capacidade de uma bateria (Q) define a sua capacidade energética, isto é, a intensidade de corrente que consegue fornecer continuamente durante 1 hora, antes de ficar sem carga. É expressa em Ampere-hora (Ah) onde, $1 Ah = 3600$ Coulombs, pois representa a transferência da carga de 1 Coulomb em 1 segundo por uma corrente de 1 Ampere. Uma

bateria com capacidade de 4 Ah pode fornecer 4 A por 1 hora ou 0,4 A por 10 horas (Husain, 2003).

A energia teórica (E_t) de uma bateria é medida em termos de sua capacidade Q (Ah) e de sua tensão de descarga em Volts (V_{bat}), sendo o resultado deste produto expresso em Watt-hora (Wh) (Husain, 2003). Noce (2009) cita como exemplo a bateria de automóvel tradicional (chumbo-ácido) que possui 12 V e 100 Ah.

$$E_t = V_{bat} \times Q_{total} [Wh] \quad (1)$$

$$E_t = 12V \times 100Ah = 1200Wh$$

Noce (2009) explica que estes valores são meramente indicativos, pois são baseados na tensão nominal da bateria. A tensão nominal da bateria é a média da tensão entre o início e o fim do procedimento de descarga, que é realizado com a corrente da bateria mantida constante.

A corrente de descarga, de acordo com Husain (2003), é medida em taxas de C , onde Q_{total} é a capacidade da bateria e I_{desc} é a corrente de descarga do teste. O valor da corrente de descarga depende do método de medição realizado e seu valor pode variar muito de um tipo de bateria para outro.

$$C = \frac{I_{desc} [A]}{Q_{total} [Ah]} \quad (2)$$

De acordo com a norma NBR 6581, o processo de descarga da bateria de chumbo-ácido deve durar 20 horas, isto é, a uma taxa de $C/20$ ou $0,05C$. Durante a descarga, a corrente deve ser mantida constante e o valor da capacidade da bateria (Q_{total}) é multiplicado por C , obtendo como resultado o valor da corrente de descarga (I_{desc}). Novamente será utilizado o exemplo dado por Noce (2009).

$$I_{desc} = \frac{C}{20} \times Q_{total} [A] \quad (3)$$

$$I_{desc} = 0,05C \times 100Ah = 5A$$

Com este valor de descarga, a norma NBR 6581 visa garantir que uma bateria de chumbo-ácido de capacidade de 100 Ah seja capaz de fornecer 5 A, durante 20 horas, com uma tensão média em torno de 12 V, que é a tensão nominal da bateria analisada. As taxas de descarga são determinadas por norma, pois se a bateria citada no exemplo fosse submetida a uma taxa de descarga de $C/10$, não se pode afirmar que esta mesma bateria poderia fornecer 10 A durante 10 horas.

Quando não é conhecido o gráfico de descarga de determinada bateria, Noce (2009) salienta que alguns ensaios devam ser realizados para determinar a energia prática das baterias, já que a queda da capacidade (ou energia total) encontra-se relacionada com o aumento da corrente de descarga. O autor realizou alguns ensaios com diferentes correntes de descarga em uma célula de Li-íon (tensão nominal de 3,6 V) até atingir a um valor de tensão limiar (valor padronizado), conforme Figura 20, onde a bateria é declarada esgotada e não mais funcional (2 V).

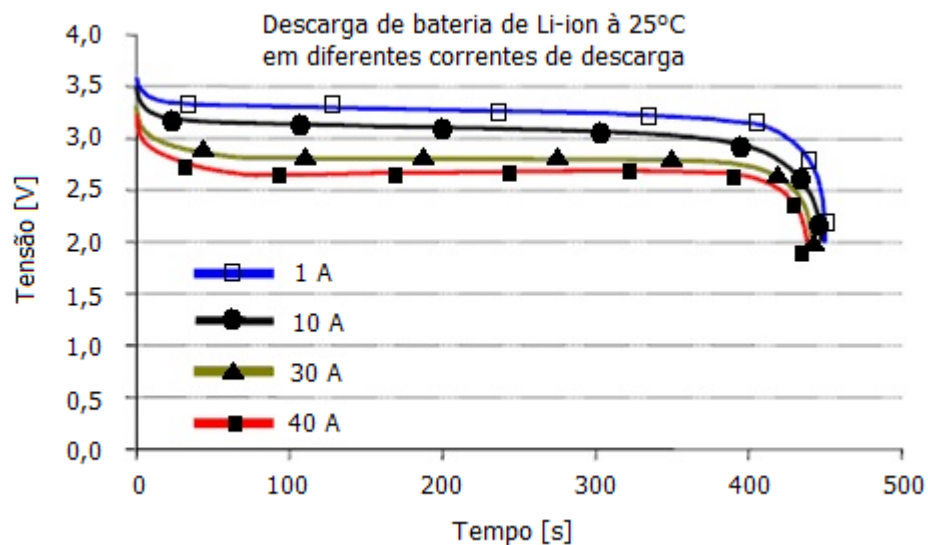


Figura 20: Gráfico de descarga de uma bateria de Li-íon
Fonte: Noce, 2009

A energia prática de uma bateria (E_p) é a energia disponível para a movimentação do VE. Esta pode ser definida pela integral da tensão nominal (V) multiplicada pela corrente de

descarga (i) entre os tempos t_0 (bateria completamente carregada) e t_{corte} (bateria completamente descarregada) (Husain, 2003).

$$E_p = \int_{t=0}^{t=\text{corte}} (V \times i) dt [\text{Wh}] \quad (4)$$

3.3.3. Energia de operação das baterias

A norma *Battery Test Manual*, publicada pelo departamento americano de energia (U. S. Department of Energy), estabelece limites de tensão de operação das baterias automotivas. De acordo com a norma, o estado de carga da bateria (SOC – *State-of-Charge*), expressa em porcentagem (%) encontra-se compreendida entre V_{min_0} (0%) e $V_{\text{max}_{100}}$ (100%) (U. S. Department of Energy, 2015).

A Figura 21 ilustra o range de operação da bateria que deve estar compreendido entre $V_{\text{max}_{\text{op}}}$ e $V_{\text{min}_{\text{op}}}$. O valor $V_{\text{min}_{\text{op}}}$ é o mínimo valor de energia que a bateria consegue suprir e tal valor deve ser fornecido pelo seu fabricante. Geralmente, $V_{\text{min}_{\text{op}}}$ é maior que V_{min_0} (0% SOC). O limite $V_{\text{max}_{\text{op}}}$ geralmente é menor que $V_{\text{max}_{100}}$ (100% SOC) devido às questões de segurança relacionadas ao aquecimento da bateria durante a recarga (U. S. Department of Energy, 2015).

Conforme a norma *Battery Test Manual*, a bateria deve ser capaz de suportar pulsos de tensão e limites máximo ($V_{\text{max}_{\text{pulse}}}$) e mínimo ($V_{\text{min}_{\text{pulse}}}$) devem ser especificados pelo fabricante para pulsos de curta duração (≤ 10 segundos) ou descarga (≤ 1 segundo). O valor $V_{\text{min}_{\text{LowT}}}$ é definido pelo fabricante como a mínima tensão permitida, nas condições ambientais igual ou inferior a 0 °C.

Quando são submetidas a um fluxo de energia muito elevado, as baterias, segundo Ferreira (2014), são desligadas pelo sistema de proteção de suas células, que impedem que o banco de baterias seja utilizado em condições de riscos.

Em um VEH *plug-in*, série ou paralelo, a bateria é utilizada para deslocar o veículo até atingir o valor de tensão $V_{min_{op}}$. Quando a bateria descarrega, o MCI é acionado para fornecer energia para o motor elétrico (Husain, 2003).

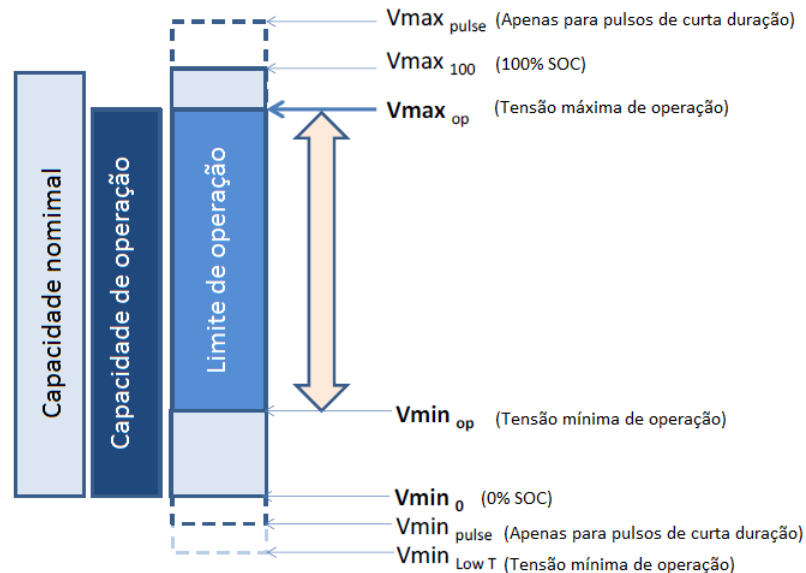


Figura 21: Diagrama de limites de tensão de uma bateria

Fonte: U.S. Department of Energy, 2015

No exemplo dado por Baran (2012), de acordo com a Figura 22, a bateria trabalha na faixa de 25% a 90% SOC, isto significa que inicia seu ciclo em 90% SOC ($V_{max_{op}}$) e opera no modo carga depletada (CD – *Charge Depleting*) até atingir 25% SOC ($V_{min_{op}}$), quando passa a operar no modo carga sustentada (CS – *Charge Sustaining*). No modo CS, a carga da bateria passa a ser “sustentada” pelo MCI, que passa a fornecer energia para o motor elétrico. A bateria do VEH permanece no modo CS até ser novamente conectada à rede elétrica para a recarga.

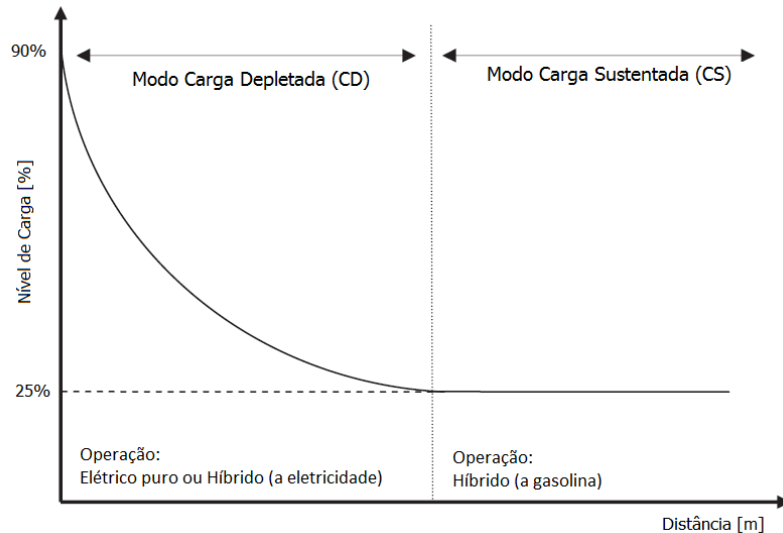


Figura 22: Modos de operação da bateria de um VEHP

Fonte: Baran, 2012

Como o VE utiliza apenas a energia da bateria, sua bateria opera apenas no modo CD. Ao atingir o limite de tensão de operação ($V_{min_{op}}$) se faz necessário o urgente carregamento do veículo.

Com o uso e o passar do tempo, o desempenho da bateria pode ser comprometido, incluindo potência, capacidade de armazenamento e segurança. Segundo Baran (2012), os principais indicadores da longevidade de uma bateria são:

- Tempo de uso que está relacionado à degradação da bateria com o passar do tempo, independente do quanto e como é utilizada;
- Número de ciclos profundos, que está relacionado à quantidade de descargas e recargas suportadas pela bateria, iniciando em $V_{max_{op}}$ e terminando em $V_{min_{op}}$;
- Número de ciclos rasos, que está relacionado com a quantidade de vezes que varia o estado de carga da bateria, entre $V_{max_{op}}$ e $V_{min_{op}}$;
- A temperatura, que pode reduzir a vida útil da bateria quando exposta a altas temperaturas, já que armazenam energia elétrica em forma química.

Os ciclos rasos degradam a bateria em menor escala que os ciclos profundos, porém acontecem com maior frequência. São provocados em sua maioria, pela frenagem

regenerativa, nos VE e VEH, e pelo MCI nos veículos VEH de configuração série (Baran, 2012).

No presente trabalho, o estado de carga da bateria (SOC) será considerado o range de operação da bateria, compreendido entre $V_{\max_{op}}$ e $V_{\min_{op}}$. $V_{\min_{op}}$ será considerado igual a 0% SOC e $V_{\max_{op}}$ será considerado igual a 100% SOC.

3.3.4. Resistência interna de uma bateria

O banco de baterias consiste em células eletroquímicas, geralmente conectadas em série, com alta resistência, resultado da soma das resistências das células. A alta resistência série do banco de baterias é o que a caracteriza com baixa densidade de potência. Devido à baixa densidade de potência, as baterias não fornecem grandes fluxos de potência quando solicitado, como por exemplo, nas acelerações do VE (Oliveira, 2005).

De acordo com Vairamohan (2002), o modelo de bateria mais comum, que representa uma bateria ideal, é composto por uma tensão interna V_0 e uma resistência interna equivalente R_{int} , conforme ilustra a Figura 23.

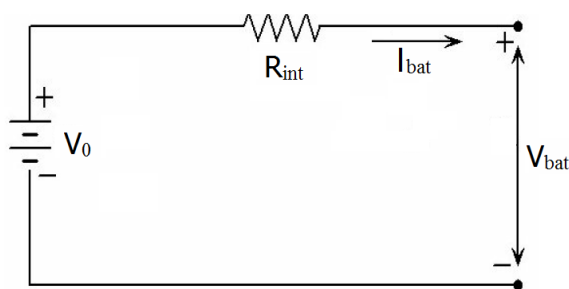


Figura 23: Modelo linear de uma bateria

Fonte: Vairamohan, 2002.

A tensão V_{bat} representa a tensão nos terminais da bateria em circuito aberto, sem nenhum componente conectado aos terminais da bateria. Quando componentes são conectados

nos terminais da bateria, a corrente elétrica I_{bat} é em função dos componentes conectados e da resistência interna da bateria R_{int} .

$$V_{bat} = V_0 - I_{bat} \times R_{int} [V] \quad (5)$$

Segundo Vairamohan (2002), o modelo ilustrado na Figura 23 não considera a variação da resistência interna da bateria em função da temperatura, estado de carga e concentração eletrolítica e por isso não pode ser utilizado para aplicações em VE e VEH. Devido às características não lineares, segundo o autor, o modelo que melhor representa o comportamento dinâmico de uma bateria é o modelo modificado de Thevenin (Figura 24).

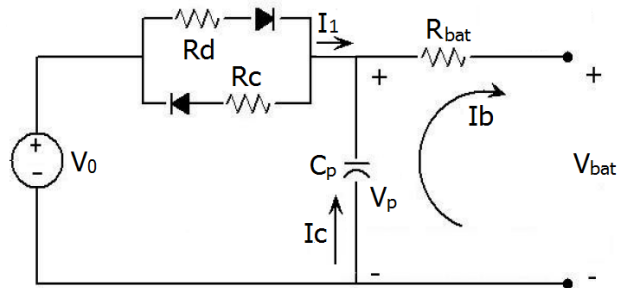


Figura 24: Modelo modificado de Thevenin de uma bateria

Fonte: Vairamohan, 2002.

No modelo da Figura 24, são consideradas duas resistências internas, R_c está associada à resistência de recarga e R_d está associada à resistência interna de descarga. As resistências, de acordo com Vairamohan (2002), modelam todas as formas de perda de energia (elétrica e química) e variam ao longo do processo de recarga ou descarga. Os diodos estão presentes apenas para fins de modelagem, para indicar que, durante a recarga ou descarga, apenas uma das resistências será considerada. A resistência R_{bat} representa a resistência no terminal da bateria. A capacitância C_p representa a capacitância de polarização e não necessariamente a capacitância puramente elétrica das placas paralelas da bateria. A capacitância de polarização está associada às condições transitórias de corrente que ocorrem dentro da bateria, que depende da temperatura, do SOC e do design da bateria (Vairamohan, 2002).

A tensão V_{bat} , para este novo modelo de bateria, foi calculada considerando o processo de descarga da bateria e aplicando a lei de Kirchhoff no circuito da Figura 24:

$$V_0 - (R_d \times i_1) - V_p = 0[V] \quad (6)$$

$$i_1 = i_b + i_c [A] \quad (7)$$

$$i_c = C \frac{dV_p}{dt} [A] \quad (8)$$

$$i_b = \frac{V_p - V_{bat}}{R_{bat}} [A] \quad (9)$$

Substituindo (8) em (7) e depois em (6), temos:

$$\frac{dV_p}{dt} = \frac{V_0}{R_d C} - \frac{i_b}{C} - \frac{V_p}{R_d C} [V] \quad (10)$$

De (9) temos a equação (11):

$$V_{bat} = V_p - (R_{bat} \times i_b) [V] \quad (11)$$

De acordo com Oliveira (2005), para obter V_{bat} é necessário calcular V_p , que por sua vez precisa do valor de V_0 , que é um parâmetro difícil de ser determinado. O autor ressalta que i_b pode ser medido e que o valor de R_{bat} é fornecido pelo fabricante e encontrado no catálogo da bateria em análise.

3.3.5. Ultracapacitores

Além da bateria, estão presentes nos VEs os ultracapacitores ou EDLC' (*Electronic Double Layer Capacitor*), que são capacitores utilizados em conjunto com a bateria, de modo a permitir elevadas potências de descarga além de absorver e fornecer ao motor elétrico, picos elétricos que seriam nocivos à bateria. Os ultracapacitores absorvem ou transferem energia

através do fluxo de cargas elétricas em grandes quantidades e em curtos intervalos de tempo, já que o processamento de energia não se faz por meio de reação química (Ferreira, 2014).

Durante as acelerações, grandes picos de corrente são exigidas pelo motor. A bateria é um dispositivo que sofre problemas de sobreaquecimento e tem seu ciclo de vida e durabilidade comprometidos quando submetida a solicitações abruptas de corrente e elevadas taxas de carga e descarga. O emprego dos ultracapacitores aumenta a vida útil da bateria, em especial no VEH de configuração série, que está sujeito a um grande número de ciclos rasos (Burke, 2007).

Os ultracapacitores ou supercapacitores possuem duas características importantes: Alta densidade de potência e baixa densidade energética. A alta densidade de potência permite que se tenha alta capacidade de carga e descarga, suportando centenas de milhares de ciclos profundos. Esta característica é aplicada para proteger a bateria de sobrecargas de potência que ocorrem, por exemplo, nos instantes de aceleração do VE (Burke, 2007).

A baixa densidade energética está relacionada à baixa capacidade de armazenamento. Os ultracapacitores apresentam maior capacidade de armazenamento que os capacitores convencionais, porém é bem menor quando comparado à bateria, que depende desta característica para determinar a autonomia de um VE. Nos ultracapacitores, a densidade energética se situa entre 4-8 Wh/kg enquanto a densidade de potência encontra-se entre 800-1400 W/kg (Baran, 2012).

O banco de baterias apresenta alta resistência série, ao contrário do banco de supercapacitores, que apresenta resistência série muito baixa. É esta característica que permite aos ultracapacitores operar com correntes elevadas, com capacidade de suportar grandes picos de corrente durante as acelerações e fornecer altas densidades de potência (Cao e Emadi, 2012).

A alta densidade de potência dos ultracapacitores garante o bom desempenho durante as acelerações. Ferreira (2014) explica que ao solicitar aceleração por meio do pedal do acelerador, o banco de supercapacitores é quem fornece a energia necessária ao motor. No instante em que a velocidade se torna constante, o banco de baterias passa a ser o responsável pelo fornecimento da energia necessária. A tensão no banco de capacitores será reduzida, nas

acelerações, até atingir o seu valor mínimo de operação, determinado pelo seu fabricante. Após a descarga do banco de capacitores, estes são recarregados pelo banco de bateria. Para a recarga dos ultracapacitores, as baterias se descarregam a uma taxa de descarga igual à corrente nominal (1 C).

Burke (2007) destaca que, apesar da bateria ser o principal componente do sistema de armazenamento, não é possível atender a todas as exigências energéticas desejáveis em um VE, utilizando apenas um elemento de armazenamento. A combinação das baterias com supercapacitores proporciona otimização do fluxo de potência, aumento do rendimento, resposta rápida às solicitações de energia, redução da capacidade necessária da bateria e, conseqüentemente, redução de custo.

A associação dos ultracapacitores ao banco de baterias é realizada por meio de um conversor CC-CC bidirecional, responsável pelo gerenciamento de energia nos instantes de tração e em frenagem regenerativa. Nos momentos de aceleração, o conversor é capaz de operar no modo elevador de tensão (*Boost*) e nos momentos de frenagem é capaz de operar como abaixador de tensão (*Buck*) (Ferreira, 2014).

Dentre as diversas configurações de associação entre baterias e ultracapacitores, no modelo proposto por Ferreira (2014), são utilizados dois conversores CC-CC bidirecional conforme Figura 25. O Conversor CC-CC Bidirecional 1 é o responsável pela troca de energia entre o banco de bateria e os ultracapacitores, enquanto o outro Conversor CC-CC Bidirecional 2 é o responsável pelo controle do suprimento de energia durante as acelerações e a absorção de energia durante as frenagens regenerativas.

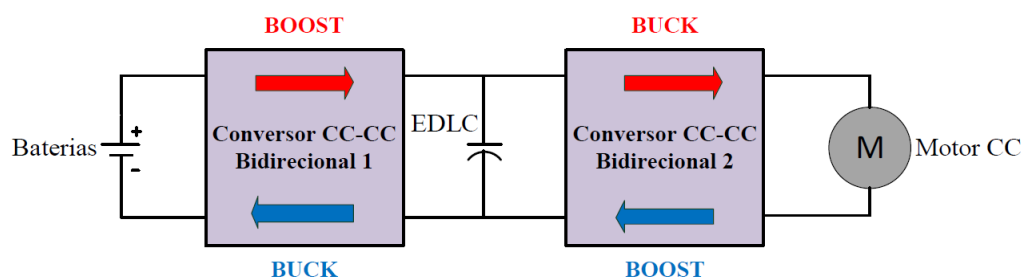


Figura 25: Conversores CC-CC bidirecional
Fonte: Ferreira, 2014

Quando se tratar da maioria dos VEs que possuem motores CA trifásicos, é necessário a inserção de um conversor CC-CA entre o conversor CC-CC Bidirecional 2 e o motor CA.

3.4. Frenagem regenerativa

O sistema de freio tem como função permitir ao motorista diminuir a velocidade, controlar o veículo durante a desaceleração e até mesmo permitir uma parada emergencial. Todo veículo, seja sua motorização a combustão, elétrica ou outros, necessita do sistema de freio para reduzir sua velocidade e parar quando desejável. Durante a frenagem convencional, que pode ser utilizando freios a disco ou freios a tambor, a energia cinética é transformada em energia térmica, que por sua vez é dissipada para o meio ambiente em forma de calor (Kobayashi *et al.*, 2009).

A frenagem regenerativa (RBS – *Regenerative Braking System*) surgiu com a proposta de ajudar a melhorar o desempenho dos VE e VEH, transformando a energia cinética do automóvel, dissipada no processo de frenagem, em energia elétrica, que é utilizada para recarregar as baterias (Delgado, 2010).

A regeneração da energia só é possível porque o motor elétrico é, na verdade, uma máquina elétrica que pode assumir a função de motor ou gerador. De acordo com a Figura 26, na função motor, a máquina elétrica traciona o VE através da aceleração, consumindo energia elétrica da bateria para transformá-la em energia mecânica (cinética).

Quando se retira o pé do pedal do acelerador, o veículo continua em movimento por inércia, porém sua velocidade vai diminuindo devido à frenagem do motor (freio motor). Quando em declives, mesmo utilizando o freio motor, o veículo ganha velocidade, sendo necessário o uso do pedal do freio. Nestas duas últimas situações não há consumo da energia da bateria e a energia cinética das rodas é transferida para o eixo do rotor do motor, que passará a assumir a função de gerador, conforme ilustra a Figura 26. Neste momento ocorre a transformação da energia cinética das rodas em energia elétrica, que é drenada para o banco de baterias e ultracapacitores (Lenz, 2013).

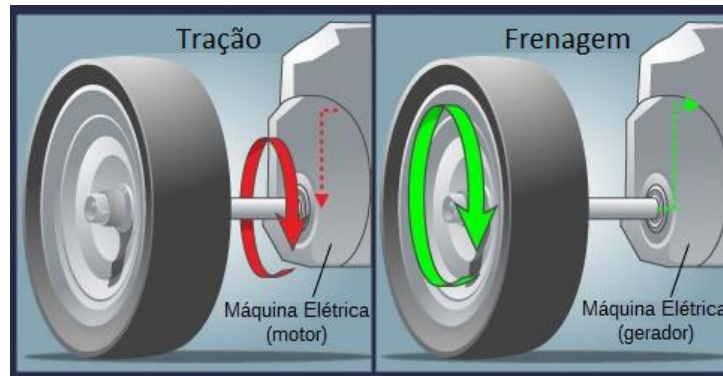


Figura 26: Frenagem regenerativa
Fonte: Lenz, 2013

Como mostra a Figura 27, a máquina elétrica é capaz de operar em quatro modos de operação denominados quadrantes de acionamento, onde são consideradas as variáveis de torque e velocidade.

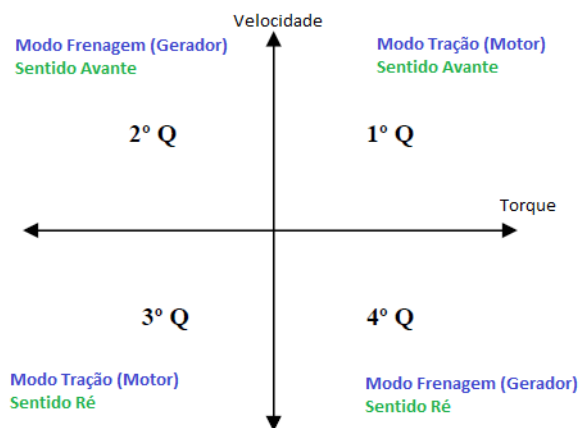


Figura 27: Quadrante de acionamento da máquina elétrica
Fonte: Adaptado de Lenz (2013)

Considerando o comportamento da máquina elétrica em um VE, os modos de operação ocorrem nas seguintes condições:

- 1º Quadrante: O veículo se encontra em aceleração no sentido avante, a máquina elétrica operando como motor, por convenção, velocidade e torque de mesmo sentido assumem valores positivos;

- 2° Quadrante: O veículo se encontra no sentido avante por inércia, sem acionamento da aceleração (modo frenagem), máquina elétrica operando como gerador, velocidade positiva e o torque negativo, pois está agindo contra o movimento da inércia (atuação do freio motor);
- 3° Quadrante: O veículo se encontra em aceleração no sentido ré, a máquina elétrica operando como motor, velocidade e torque de mesmo sentido assumem valores negativos;
- 4° Quadrante: O veículo se encontra no sentido ré por inércia, sem acionamento da aceleração (modo frenagem), máquina elétrica operando como gerador, velocidade negativa e o torque positivo, pois está agindo contra o movimento da inércia (atuação do freio motor);

No diagrama proposto por Chan (2002), na Figura 28, os sinais de controle são representados por uma linha fina, os sinais elétricos são representados por uma linha grossa e as ligações mecânicas são representadas por uma linha dupla. De acordo com os sinais dos pedais do freio e do acelerador, o controlador fornece sinais de controle apropriados ao conversor CC-CC bidirecional que opera regulando o fluxo de energia entre o motor e os elementos armazenadores (baterias e ultracapacitores). Na aceleração, o fluxo de energia ocorre entre os elementos armazenadores de energia e o motor elétrico, responsável pela tração do veículo. Na RBS, o fluxo de energia elétrica se inverte, sendo do motor elétrico, que passa a operar no modo gerador, aos elementos armazenadores de energia.

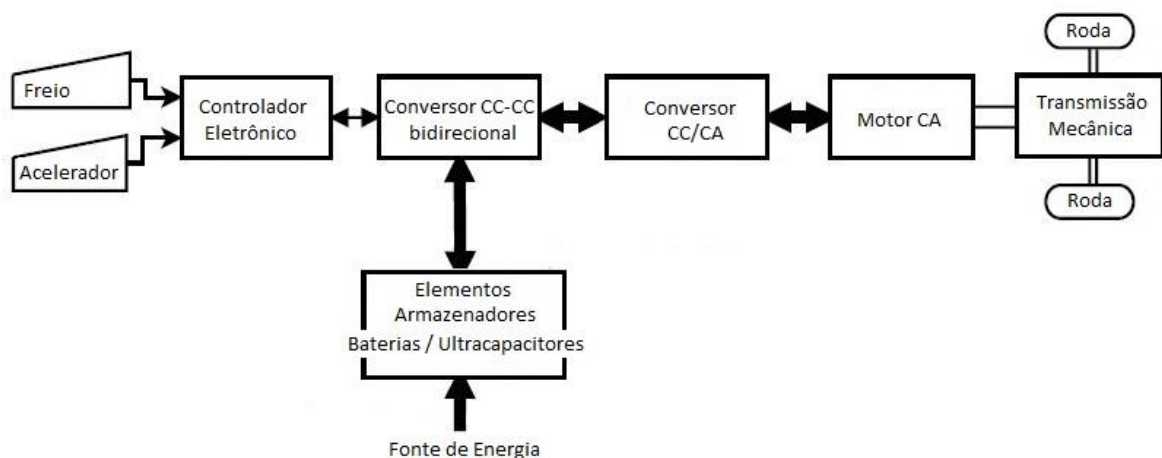


Figura 28: Diagrama estrutural do veículo elétrico
 Fonte: Adaptado de Chan (2002)

A RBS está presente no eixo tracionado do veículo, em sua maioria nas rodas dianteiras, já que a maioria dos automóveis é de tração dianteira. Como observado na Figura 29, a frenagem regenerativa é utilizada para desenvolver força de frenagem no eixo tracionado, operando em conjunto com o freio mecânico presente nas rodas, já que o motor elétrico não possui torque suficiente para a frenagem total do veículo quando necessário. Em alguns veículos, como VEHP Toyota Prius, a RBS encontra-se presente nas quatro rodas para melhor aproveitamento da energia da frenagem (Lenz, 2013).

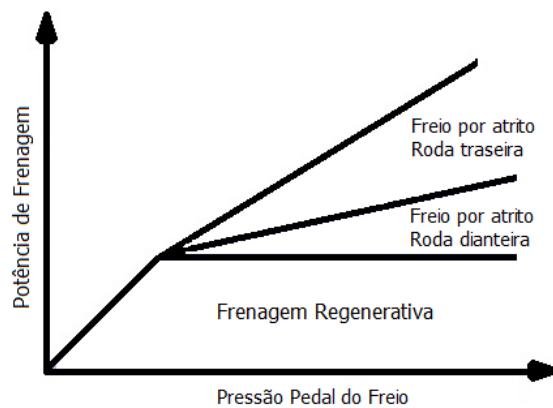


Figura 29: Gráfico da frenagem de um veículo com RBS

Fonte: Adaptado de Lenz (2013).

O gerenciamento da energia entre o motor elétrico e as unidades armazenadoras de energia (baterias e ultracapacitores) é realizado por meio de um conversor CC-CC bidirecional. O conversor CC-CC bidirecional é composto por semicondutores (transistores e diodos) que tem por função adaptar os níveis de tensão entre os terminais de entrada e saída permitindo o fluxo de corrente em ambos os sentidos (Ferreira, 2014).

Quando há a transferência de energia da fonte V_1 para a fonte V_2 , nos momentos de aceleração, o conversor deve operar no modo elevador de tensão (*Boost*) de modo a fornecer energia das fontes armazenadoras para o motor elétrico. Em frenagem regenerativa, quando a rotação das rodas proporciona a rotação do eixo do motor, que passa a assumir a função de gerador, a transferência de energia ocorre da fonte V_2 para a fonte V_1 e o conversor deve operar no modo abaixador de tensão (*Buck*). Para operar nestas duas condições (*Boost* e *Buck*) é necessário coordenar a operação dos semicondutores da Figura 30. Ferreira (2014) esclarece que a operação proposta na Tabela 6 é válida apenas para o uso de uma célula básica do conversor CC-CC bidirecional.

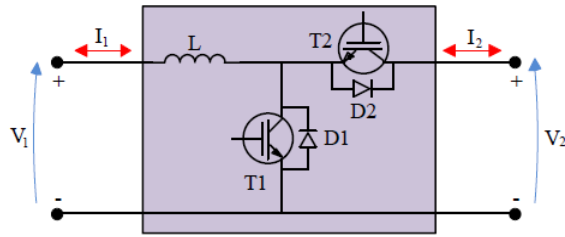


Figura 30: Conversor CC-CC bidirecional básico

Fonte: Ferreira, 2014

Tabela 6: Operação do conversor CC-CC bidirecional básico

Operação	Semicondutores Ativos	Orientação das Correntes
Buck	T ₂ , D ₁	$I_1 < 0$, $I_2 < 0$
Boost	T ₁ , D ₂	$I_1 > 0$, $I_2 > 0$

Fonte: Ferreira, 2014

Ferreira (2014) explica que o fluxo da energia regenerada na frenagem depende das necessidades energéticas de cada uma das fontes armazenadoras de energia. Se os ultracapacitores estiverem carregados, a energia é então direcionada ao banco de baterias.

Na RBS, a maior parte da energia devolvida para os elementos armazenadores de energia (baterias e ultracapacitores) vem da inércia dos componentes rotativos do veículo. Durante a desaceleração, os componentes rotativos contribuem com a energia regenerada através da força produzida, por inércia, de cada um dos elementos, onde a força de tração F_{trac} é resultado da soma das forças aerodinâmica F_{aero} e da força exercida pela resistência ao rolamento F_{rr} e das forças geradas pela inércia dos componentes como força de transmissão $F_{trans,I}$, força das rodas $F_{w/t,I}$, força da linha de Cardan (eixo de tração) $F_{driveline,I}$ e da força do Motor/Gerador $F_{M/G,I}$ (Delgado, 2014).

$$F_{trac} = F_{aero} + F_{rr} \times (F_{trans,I} + F_{w/t,I} + F_{driveline,I} + F_{M/G,I}) [N] \quad (12)$$

Nem toda a energia é recuperada devido à ineficiência dos componentes, atrito nos freios e nos eixos. A potência recuperada, de acordo com Delgado (2014) é estimada da potência armazenada na inércia rotativa, resultado do produto entre a velocidade S e cada uma

das forças inerciais F_I dos componentes envolvidos, onde também se considera as perdas de potência geradas pelo atrito do freio, a linha de Cardan e a eficiência do motor/gerador. A energia obtida de cada componente rotativo é resultado da integral da potência.

$$P_I = F_I \times S[W] \quad (13)$$

$$E(t) = \int P(t)dt[Wh] \quad (14)$$

As equações 13 e 14 foram aplicadas, segundo Delgado (2014), em dois veículos, com frenagem regenerativa instalada nas 2 rodas e nas 4 rodas, a fim de determinar a energia recuperada. Constatou-se que a energia da frenagem encaminhada à bateria do veículo com a frenagem regenerativa instalada em um eixo (2 rodas) foi 53% menor que a energia da frenagem do veículo instalado nos dois eixos.

No exemplo dado por Nunes (2014), durante a frenagem regenerativa do Toyota Prius, em uma desaceleração de 60 km/h até parar, consegue-se recuperar cerca de 1% a 3% de sua bateria, o que representaria aproximadamente 750 metros a mais de autonomia para o veículo no modo puramente elétrico.

3.5. Carregamento lento e rápido

Além da autonomia, o tempo de carregamento associado à quantidade de postos de recarga é outro obstáculo enfrentado pelos proprietários de veículos elétricos (Martins e Brito, 2011). De acordo com GE (2012), para cada veículo elétrico em circulação são necessários 1,5 estações de carregamento, que podem estar localizados nos domicílios, trabalho, shoppings e estacionamentos. Segundo dados divulgados (GE, 2012), 60% destes veículos elétricos serão recarregados no trabalho e em seus domicílios.

Atualmente, são conhecidos no mercado dois tipos de carregamento; o carregamento lento e o rápido. Segundo Noce (2009), ainda há a proposta de mais outras duas formas de carregamento; a troca rápida de bateria e a recarga em movimento, prevista para estradas automatizadas.

A troca rápida de bateria consiste na substituição da bateria por outra que já estivesse carregada. Esta manobra poderia ser realizada por um operador ou pelo próprio motorista. Segundo Noce (2009), o tempo de troca seria inferior ao abastecimento a gasolina, estimando em torno de 5 minutos.

Na recarga em movimento, o veículo deve ser conduzido sobre uma faixa de rolagem específica, em uma rodovia com infraestrutura adequada, onde um barramento transfere energia ao veículo, por indução ou contato, em uma taxa maior que aquela gasta pelo veículo (Noce, 2009).

O carregamento lento é considerado o tipo de recarga mais econômico, pois é realizada em baixa potência. Este tipo de carregamento costuma demorar algumas horas para a recarga completa e geralmente ocorre por meio de tomadas domésticas (GE, 2012).

A recarga rápida consiste em fornecer altos valores de corrente. Devido ao aumento da corrente de recarga é necessária maior potência, portanto, cabos de maior seção e dispositivos de proteção de sobrecarga e curto-circuito. Geralmente este tipo de recarga costuma demorar algumas dezenas de minutos para o carregamento completo (GE, 2012).

Apesar da divisão entre carregamento rápido e lento, a norma IEC 61851-1:2010 *Electric Vehicle Conductive Charging System* determina a recarga de veículos elétricos em 4 modos de carregamento, conforme ilustrado na Figura 31 (IEC, 2010).

- Modo 1: Carregamento do VE em rede CA (corrente alternada), utilizando uma tomada comum que não exceda 16 A. Este modo de carregamento é proibido nos EUA por questões de segurança.
- Modo 2: Carregamento do VE em rede de alimentação CA, utilizando uma tomada comum com dispositivo de proteção incorporado ao cabo, para ligação monofásica ou trifásica que não exceda 32 A.
- Modo 3: Carregamento do VE com a rede de alimentação CA, utilizando uma tomada dedicada com dispositivos de proteção integrados, para ligação monofásica ou trifásica que não exceda 63 A.

- Modo 4: Carregamento do VE em alta potência, por meio de corrente contínua (CC) com tomada dedicada. Neste modo de carregamento, a corrente é fornecida diretamente para a bateria do carro.

Na recarga rápida, a conversão da energia CA em CC ocorre fora do veículo e a entrega da energia é realizada diretamente para a bateria, através de outra tomada instalada no veículo. Devido a isso, nem todos os veículos elétricos possuem tomada de carregamento rápido (Martins e Brito, 2011). A necessidade de uma tomada específica de carregamento rápido se deve ao fato de o aquecimento e formação de gases que podem resultar em explosões e incêndios, ao recarregar uma bateria em níveis de potência mais altos. Devido a isso, por questões de segurança, em recarga rápida a bateria é recarregada em até 80% de sua capacidade de carga (Rosolem *et al.* 2012).

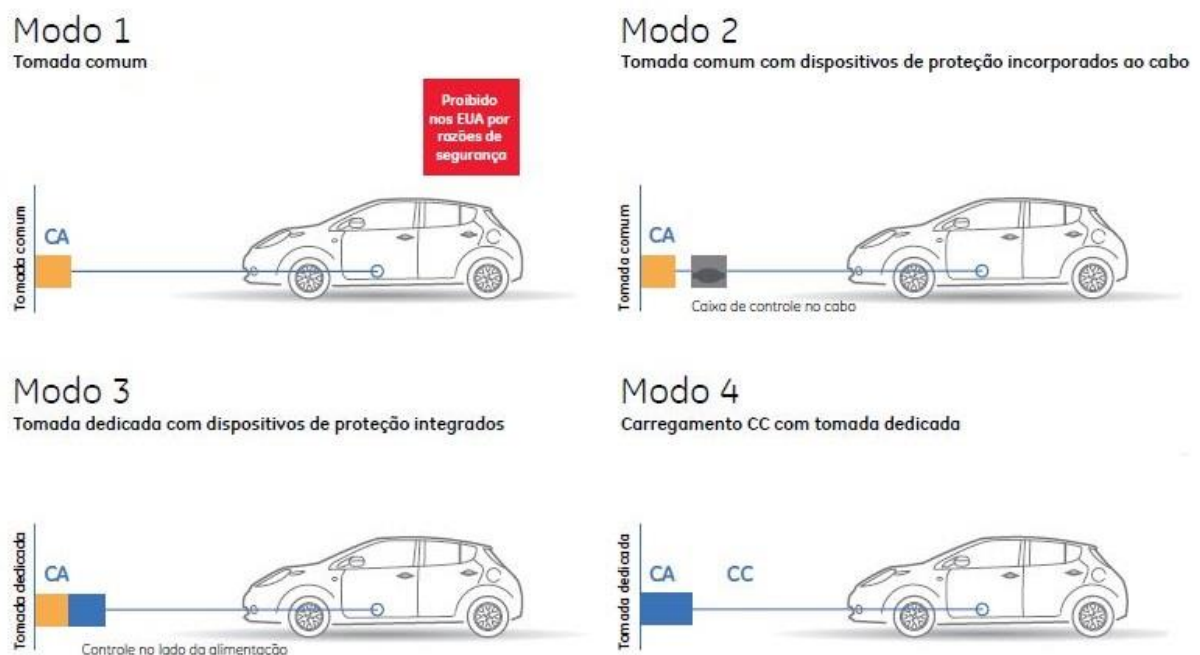


Figura 31: Modos de carregamento conforme IEC 61851

Fonte: GE, 2012

A Tabela 7 apresenta os modos de carregamento de maneira mais detalhada. Os modos de carregamento de 1 a 3 são realizados por meio da tomada SAE J1772 instalado no veículo. O *plug* de alimentação utilizado vai depender do modo de carregamento. O modo 4 de

carregamento é realizado por meio de outra tomada instalada no veículo denominada CHAdeMO (GE, 2012).

Tabela 7: Modos de carregamento conforme IEC 61851

Modo de Carregamento	Alimentação	Saída Máxima	Tomada	Segurança	Velocidade
Modo 1	CA	16 A / 230 V	Monofásica com aterramento	A proteção está integrada ao cabo	Lenta
Modo 2	CA	32 A / 400 V	Monofásica ou Trifásica	Com dispositivo de proteção integrado ao cabo	Lenta
Modo 3	CA	63 A / 400 V	Trifásica	Dispositivo de proteção integrado à estação de carregamento	Rápida
Modo 4	CC	250 A / 600V	CHAdeMO	Dispositivo de proteção integrado à estação de carregamento	Ultrarrápida

Fonte: Elaboração própria a partir dos dados de GE (2012).

4. FIAT 500 ELÉTRICO

O presente capítulo apresenta o veículo elétrico em estudo, o Fiat 500e, desde o surgimento do primeiro Fiat 500, na década de 1950, até as razões que o transformaram na versão elétrica. Também são apresentadas as características técnicas e a gestão da recarga da bateria do veículo.

4.1. A história do Fiat 500

Durante a Segunda Guerra Mundial, a produção de veículos de motor a combustão ficou interrompida para uso civil. A produção de automóveis foi retomada com o fim do conflito e a década de 1950 ficou marcada como a “década de contrastes”, pois de um lado os americanos, na euforia da prosperidade, estimulavam a competição de lançar carros cada vez maiores, mais largos e pomposos e do outro lado estava a Europa, que arrasada pela guerra, necessitava fabricar carros pequenos, simples, baratos e econômicos (Perracini, 1990).

Para atender a demanda do mercado pós-guerra, a montadora italiana Fiat (*Fabbrica Italiana Automobili Torino*) lançou em 1957 o modelo “500”, um veículo a combustão que se tornou extremamente popular na Europa por ser um carro prático e barato. Segundo Record Go (2015), o Fiat 500, ilustrado na Figura 32, era encarregado de motorizar a Europa no período pós-guerra e, devido à popularidade alcançada, acabou se tornando um ícone da Itália. A produção da primeira fase do Fiat 500 terminou em 1975.



Figura 32: Fiat 500 lançado em 1957
Fonte: Record Go, 2015

Entre 1991 e 1998 houve uma segunda geração, com produção do Fiat “Cinquecento”, com o nome sendo divulgado pela maneira escrita e não numeral como antes. A Figura 33 ilustra o “Cinquecento” que era fabricado exclusivamente na fábrica de Tychy, na Polônia e teve sua produção encerrada em 1998 (Comdc, 2011).



Figura 33: Fiat Cinquecento
Fonte: Comdc, 2011

Exatamente 50 anos após o lançamento do primeiro modelo “500”, a Fiat lançou a terceira geração do veículo. O veículo foi apresentado no Salão do Automóvel de Genebra em 2007 e lançado no Brasil em 2009, chegando ao país importado da unidade da Polônia (Record Go, 2015).

Ainda no ano de 2009, a montadora americana Chrysler decretou falência e com a ajuda do governo americano foi adquirida pela Fiat em 2014, como uma estratégia da empresa de entrar no mercado americano, tornando-se FCA (*Fiat Chrysler Automobiles*). Com a compra da Chrysler, o Fiat 500, ilustrado na Figura 34, passou a ser fabricado na fábrica de Toluca no México e passou a ser vendido nos EUA e no Brasil.



Figura 34: Terceira geração do Fiat 500
Fonte: Record Go, 2015

Para a venda no mercado brasileiro, foi inserida a motorização “flex” (gasolina/etanol) no Fiat 500 vendido no país. Atualmente o veículo é vendido no Brasil com duas versões de motorização, a gasolina e flex.

4.2. Fiat 500 elétrico

Ao adquirir a montadora Chrysler e inserir no mercado americano, a Fiat também deveria cumprir a legislação americana que determina a obrigatoriedade das montadoras em fornecer veículos elétricos a seus consumidores, em especial no estado da Califórnia (PluginCars, 2016).

A Figura 35 ilustra o Fiat 500e, a versão elétrica do Fiat 500, apresentado em 2012 no Salão do Automóvel de Los Angeles. O veículo, produzido na planta de Toluca, encontra-se disponível para venda apenas nos estados americanos da Califórnia e Oregon para atender às regulações de emissões exigidos no programa ZEV (Fiat USA, 2016).

Segundo divulgado pela reportagem do PluginCars (2016), a escolha de transformar o Fiat 500 em um veículo elétrico, ao invés de criar um novo modelo elétrico, foi com o propósito de não evidenciar o veículo elétrico na rua, podendo passar despercebido entre os demais veículos a combustão.



Figura 35: Fiat 500e

Fonte: Record Go, 2015

O preço de entrada do 500e é US\$ 31.800, mas o governo americano dá incentivos para a compra, não com desconto de impostos, mas arca com uma parte do custo de compra (US\$ 14.000) e com isso o veículo chega a ser vendido por US\$ 17.800 conforme divulgado no site de vendas do veículo (Fiat USA, 2016).

Para cumprir a meta de vendas de veículo elétrico, o Fiat 500e tem sido oferecido cada vez com mais descontos, para atender a legislação americana. A FCA tem adotado também a estratégia de contrato de arrendamento, para uma maior difusão do veículo no mercado americano. O Fiat 500e pode ser arrendado pelo preço de US\$ 496, em um contrato de 72 meses (Fiat USA, 2016). Aos clientes que realizarem esta contratação é oferecido até doze dias de aluguel gratuito, por ano, de qualquer outro veículo, para os casos em que se precise realizar uma longa viagem, que ultrapasse muito a autonomia do 500e (Lavrinc, 2013).

4.2.1. Características técnicas do Fiat 500e

O Fiat 500e, até o momento, é o único veículo elétrico oriundo de um modelo a combustão. Apesar da semelhança com o Fiat 500 a combustão, os veículos se diferem bastante em relação às características técnicas relacionadas à propulsão.

É um veículo puramente elétrico, de duas portas e quatro lugares, da categoria de veículos leves hatchback. De acordo com o manual do veículo, atinge de 0-100 km/h em 9,1 segundos, apresenta autonomia de 84 milhas (≈ 135 km) com apenas uma carga de bateria e atinge a velocidade máxima de 137 km/h. Por conta do banco de baterias, o veículo pesa 1.355 kg enquanto o modelo flex vendido no Brasil pesa 1.080 kg (Fiat, 2015).

O 500e tem como principal característica o torque máximo disponível em qualquer rotação e o motor elétrico dispensa uma caixa de câmbio convencional. O carro possui apenas uma marcha, sem pedal de embreagem, sendo a transmissão ligada diretamente às rodas. Para a marcha ré, a polaridade da corrente do motor elétrico é invertida, fazendo-o girar para o outro sentido. Conforme mostra a Tabela 8, o motor elétrico, instalado no vão motor do 500e,

possui 83 kW de potência (ou 111 cv), 20,3 kgfm de torque e rotação máxima de 4.000 rpm (Fiat USA, 2016).

Tabela 8: Dados do motor do Fiat 500e

Veículo	Fiat 500e
Tipo do motor	Motor elétrico
Configuração do motor	Motor CA trifásico de ímã permanente
Potência máxima	83 kW / 111 cv
Torque máximo	20, 3 kgfm / 200 Nm / 147 Lb-ft
Rotação máxima	4.000 rpm

Fonte: Elaboração própria a partir dos dados de FCA USA (2016).

O Fiat 500e opera inteiramente à eletricidade, esta armazenada em maior quantidade na bateria de alta tensão de Li-íon. A bateria do 500e é fabricada pela empresa SB LiMotive, companhia pertencente às empresas Bosh e Samsung, fundada em 2008. Conforme apresentado na Tabela 9, a bateria é composta por 97 células de Li-íon, arranjadas em 5 a 6 células por módulo, 3,75 V_{nom} cada célula, totalizando 364 V. Possui capacidade energética de 62,9 Ah_{nom} e fornece 24 kWh de energia (SB LiMotive, 2011).

A temperatura de operação da bateria do Fiat 500e está entre 25°C e 30°C, para atender o ciclo de 2.200 cargas de 100% SOC, o equivalente a 6 anos de recargas completas diárias (SB LiMotive, 2011). A bateria de alta tensão do veículo possui garantia de 8 anos, visto que a bateria está mais sujeita a ciclos rasos, que degradam a bateria em menor escala, do que a ciclos profundos. Os demais componentes do veículo como o motor, o módulo conversor CA-CC, o carregador portátil do veículo e o conector de carregamento SAE J1772 possuem garantia de 4 anos (Fiat USA, 2016).

Para atingir a temperatura necessária para sua operação, a bateria do Fiat 500e possui sistema de aquecimento e arrefecimento. Além disso, possui um sistema eletrônico de gestão da temperatura, tensão, carga e função de balanceamento de cargas entre as células de Li-íon. A bateria do 500e é reciclável e dependendo do contrato de alienação do veículo ou da bateria, é possível retorná-la para o fornecedor SB LiMotive para o descarte adequado (SB LiMotive, 2011).

O Fiat 500e possui frenagem regenerativa (RBS) nas 4 rodas do veículo. Conforme divulgado no site de vendas do veículo, a regeneração da energia ocorre sempre que for acionado o pedal de freio a uma velocidade superior a 8 mph (≈ 13 km/h) (Fiat USA, 2016).

Tabela 9: Dados da bateria do Fiat 500e

Veículo	Fiat 500e
Tipo da bateria	Bateria de Li-íon
Classificação da bateria	Bateria secundária de eletrólito retido
Fabricante	SB LiMotive
Modelo	ESS F500
Peso	300 kg
Tensão	364 V
Número de células	97 células de 3,75 V cada
Tensão min/máx	2,7 V (min) - 4,115 V (máx) / célula
Capacidade nominal	62,9 Ah
Energia	24 kWh
Número de ciclos	2.200 ciclos de 100% SOC
Temperatura de operação	25°C - 30°C
Comportamento térmico	$T_{\text{cell}} > 60^{\circ}\text{C}$ - Funcionamento não permitido da bateria
	$50^{\circ}\text{C} < T_{\text{cell}} < 60^{\circ}\text{C}$ - Resfriamento ativado (direção bloqueada)
	$20^{\circ}\text{C} < T_{\text{cell}} < 50^{\circ}\text{C}$ - Resfriamento ativado
	$-10^{\circ}\text{C} < T_{\text{cell}} < 20^{\circ}\text{C}$ - Sem resfriamento / aquecimento
	$-30^{\circ}\text{C} < T_{\text{cell}} < -10^{\circ}\text{C}$ - Aquecimento ativado
	$-40^{\circ}\text{C} < T_{\text{cell}} < -30^{\circ}\text{C}$ - Aquecimento ativado (direção bloqueada)
	$T_{\text{cell}} < -40^{\circ}\text{C}$ - Funcionamento não permitido da bateria

Fonte: Elaboração própria a partir dos dados de SB LiMotive (2011).

Além do motor elétrico, banco de baterias e frenagem regenerativa, o Fiat 500e é equipado com mais alguns outros componentes específicos de um VE, conforme ilustrado na Figura 36. No local do bocal do tanque de combustível está localizado o conector de carregamento SAE J1772. O veículo está equipado com o módulo PIM (*Power Inverter Module*) que realiza a função de inversor (CA-CC) e do conversor CC-CC bidirecional. O

motor elétrico também possui um módulo refrigerador. A eletrônica de todo o sistema elétrico do veículo é controlada pelo módulo EVCU (*Electronic Vehicle Control Unit*), que realiza a interface entre motor elétrico, banco de baterias e comandos do veículo. Cabos de alta tensão também estão instalados no veículo e devido a isso, de acordo com o manual do veículo, qualquer manutenção na parte elétrica de alta tensão (364 V) deve ser realizada apenas pelo serviço técnico autorizado (Fiat, 2016b).

Como o Fiat 500e é oriundo da versão 500 a combustão, ambos os veículos são muito similares, especialmente quando relacionado às dimensões, como pode ser observado na Tabela 10. As principais diferenças surgem quando se compara motorização, peso, autonomia quando abastecido em 100% e tempo de abastecimento.

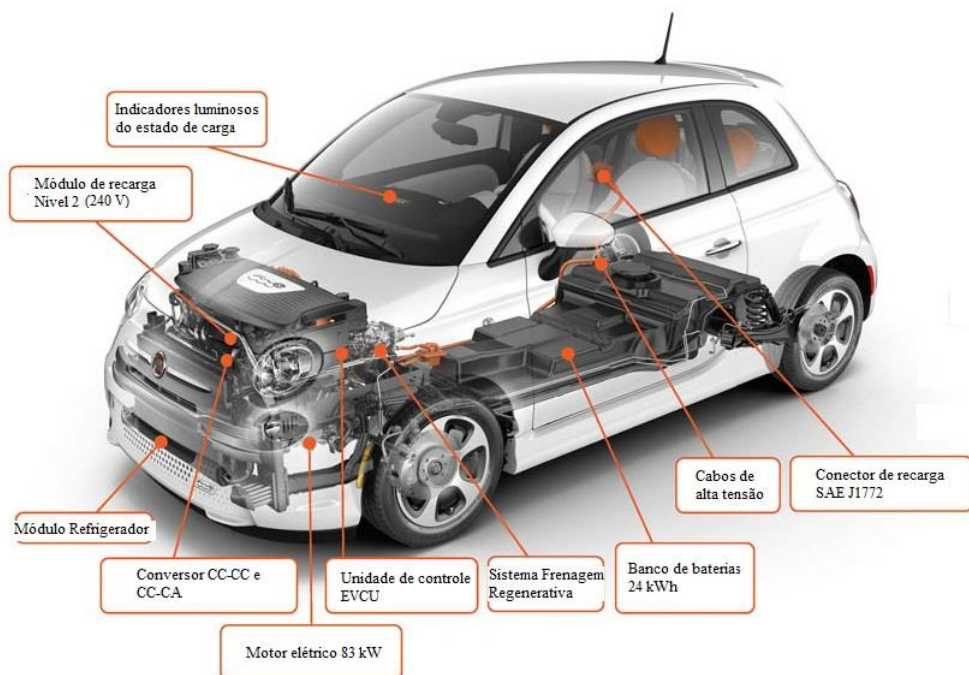


Figura 36: Configuração do Fiat 500e
 Fonte: Adaptado de Lavrinc (2013).

Tabela 10: Comparativo entre Fiat 500 e Fiat 500e

Dados Gerais	500 1.4 8V Flex	500e
Altura (mm)	1492	1492
Largura (mm)	1627	1627
Comprimento (mm)	3546	3546
Entre eixos (mm)	2300	2300
Tração	Dianteira	Dianteira
Peso (kg)	1075	1355
Combustível	Gasolina / Flex	Eletricidade
Capacidade do tanque (L)	40	-
Capacidade da bateria (kWh)	-	24
Autonomia (km)	480	135
Tipo de Motor	Combustão	Ímã permanente
Potência do motor (cv / kW)	85 / 62,5 (Gasolina)	111 / 83
	88 / 64,7 (Etanol)	
Torque (kgf)	12,4	20,3
Velocidade Máxima	170 (Gasolina)	137
	172 (Etanol)	
Tempo de abastecimento	5 min	23 h - Nível 1
		4 h - Nível 2
Sistema elétrico convencional (V / Ah)	12 / 60	12 / 500

Fonte: Elaboração própria a partir dos dados de Fiat (2015) e Fiat (2016b).

4.2.2. Carregamento da bateria do veículo

O Fiat 500e é recarregado utilizando o modo 2 de carregamento, conforme IEC 61851, através de uma tomada comum acoplada a um dispositivo de proteção incorporado ao cabo. A recarga do veículo pode ser realizada em dois níveis, Nível 1 e 2, ambos em CA. O Nível 1 de carregamento é realizado em 120 V AC e o Nível 2 é realizado em 240 V AC (Fiat, 2016b). No Fiat 500e não é permitido realizar carregamento rápido em CC.

O carregador de um VE é denominado EVSE (*Electric Vehicle Supply Equipment*). Como visualizado na Figura 37, o EVSE portátil, fornecido pela montadora do veículo, é armazenado no porta-malas do veículo juntamente com a bomba de ar para encher os pneus, já que devido ao tamanho da bateria, o veículo não possui pneu estepe.



Figura 37: Carregador portátil do Fiat 500e
Fonte: Fiat, 2016a

Encontra-se disponível para venda, nas concessionárias autorizadas, uma estação de carregamento que pode ser instalada em residências. Utilizando este tipo de EVSE é possível acionar ou interromper a recarga mesmo com o veículo conectado ao mesmo. O equipamento, ilustrado na Figura 37, ainda apresenta algumas informações ao usuário como, por exemplo, se o veículo ainda está carregando e se há energia presente no equipamento/rede elétrica (Fiat, 2016a).



Figura 38: Estação de carregamento
Fonte: Fiat, 2016a

De acordo com o manual do veículo, o tempo de carga da bateria, depende do estado atual da carga da bateria e do nível de recarga utilizado (Nível 1 ou Nível 2). De acordo com a Tabela 11, a recarga completa do veículo (0% a 100% SOC), utilizando a estação de

carregamento, possui tempo aproximado de recarga de 23 horas para o Nível 1 e 4 horas para o Nível 2 (Fiat, 2016b).

Tabela 11: Tipos de recarga do Fiat 500e

Tipo de Recarga	Tempo Aproximado
Nível 1 (120 V / 15 A)	Aprox. 23 horas para recarga completa. * 3 horas irá fornecer 10 milhas de autonomia (≈ 16 km)
Nível 2 (240 V / 30 A)	Aprox. 4 horas para recarga completa. * 30 minutos irá fornecer 10 milhas de autonomia (≈ 16 km)

Fonte: Elaboração própria a partir de dados Fiat (2016b)

O carregamento do veículo é realizado por meio do conector SAE J1772, que se encontra localizado na lateral direita do veículo, ilustrado na Figura 39, na mesma posição onde se encontra o bocal do tanque de combustível no Fiat 500 a combustão. Por meio deste conector que se realiza os carregamentos de Nível 1 e 2 (Fiat, 2016b).



Figura 39: Conector SAE J1772

Fonte: Fiat, 2016b

O quadro de instrumentos do veículo indica o estado atual de carga da bateria, de 0% a 100% SOC com incremental de 1%. Mensagens de bateria com baixa carga aparecem no painel quando a bateria atinge 17% SOC. Como observado na Figura 40, quando o estado de carga da bateria atinge 5%, a imagem de uma tartaruga aparece do display indicando que o

veículo se encontra em modo de carga extremamente baixa. A imagem permanece no display até que a condição de carga mude para valores superiores a 5% (Fiat, 2016b).

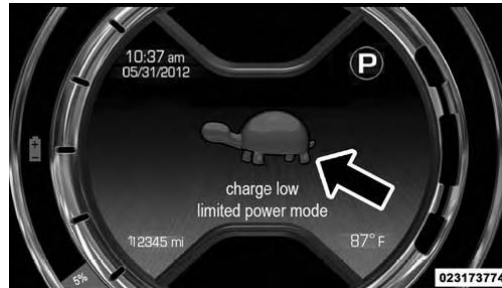


Figura 40: Indicação de modo de carga abaixo do limite permitido

Fonte: Fiat, 2016b

Quando a bateria do Fiat 500e atinge 0% de carga, controles climáticos como o aquecimento e o ar condicionado, o aquecedor de assento e o controle eletrônico de velocidade são desabilitados. De acordo com o manual do veículo, a bateria perde aproximadamente 3% de sua carga, por mês, quando o veículo não está em uso (Fiat, 2016b).

Por questões de segurança, o Fiat 500e possui diversas informações relacionadas ao estado de carga da bateria e da autonomia do veículo. O painel de instrumentos também fornece a informação do estado de carga da bateria de forma gráfica, em porcentagem e em autonomia (range em milhas), conforme Figura 41. A autonomia apresentada é uma autonomia estimada, baseada na carga atual da bateria de alta tensão e no comportamento da atual condução (Fiat, 2016b).

Ainda no painel de instrumento do veículo encontra-se, do lado direito, um indicador de comportamento de direção, o “*Driver Behavior Gauge*”. Este indicador tem por objetivo auxiliar o motorista no comportamento da condução, de modo a estender a autonomia do veículo. Este indicador possui três faixas: Power, ECO e Charge (Fiat, 2016b).

- Power: O ponteiro do quadro de instrumentos se situa nesta faixa enquanto o veículo estiver em aceleração;

- ECO: Esta faixa sinaliza o modo econômico de direção e o ponteiro se situa nesta faixa enquanto o comportamento de direção estiver na forma de maximizar o range da bateria de alta tensão;
- Charge: O ponteiro se situa nesta faixa quando, durante a condução do veículo, a bateria de alta tensão está sendo recarregada pela frenagem regenerativa.



Figura 41: Indicações do quadro de instrumentos do Fiat 500e
 Fonte: Lavrinc, 2013

Há um outro indicador de carga, instalado na parte superior do painel do veículo. O indicador de carga da Figura 42 é constituído por cinco luzes, onde cada luz representa a porcentagem de carga que a bateria está atualmente, num incremental de 20% conforme demonstrado na Tabela 12. Esta sinalização permite visualizar a carga da bateria do lado de fora do automóvel e em caso de erro no processo de carregamento, as duas luzes externas começam a piscar (Fiat, 2016a).



Figura 42: Indicador de estado de carga da bateria do Fiat 500e
 Fonte: Fiat, 2016a

Tabela 12: Indicador de estado de carga da bateria do Fiat 500e

Número de indicadores luminosos iluminados	Porcentagem da carga da bateria
1 Luz	0 - 20%
2 Luzes	21 - 40%
3 Luzes	41 - 60%
4 Luzes	61 - 80%
5 Luzes	81 - 100%

Fonte: Fiat (2016a)

Nos Estados Unidos, o 500e vem equipado com um equipamento de posicionamento global (GPS – *Global Positioning System*) da empresa Tom Tom (fruto da parceria da Fiat com a empresa). O GPS instalado, como mostra a Figura 43, calcula rotas a partir de um gerenciador de eficiência energética que indica as estações de recarga presentes mais próximas durante o trajeto realizado (Lavrinc, 2013).

Os proprietários do Fiat 500e tem acesso ao aplicativo “*Uconnect Access*” que, instalado no celular, permite obter informações referentes ao estado de carga da bateria e a autonomia do veículo. O aplicativo também permite realizar algumas ações, dentre elas, agendar uma recarga, iniciar o carregamento, bloquear e desbloquear portas e ativar remotamente o sistema de controle de climatização do veículo (Lavrinc, 2013 e Fiat, 2016b).



Figura 43: Painel do Fiat 500e equipado com GPS Tom Tom

Fonte: Lavrinc, 2013

O veículo 500e é equipado com dois sistemas elétricos, o sistema de alta tensão (364 V) que é aplicado para tracionar o veículo e o convencional sistema elétrico de 12 V, utilizado para fornecer energia para os sistemas periféricos como iluminação, ventilação, ar-condicionado, alarme, áudio, dentre outros; através de uma bateria de 12 V e 500 Ah (Fiat, 2016b).

O motor elétrico que é utilizado para tracionar o 500e também opera no modo gerador através do RBS. Por meio da RBS, a energia elétrica que é gerada retorna para a bateria de alta tensão, aumentando a autonomia do veículo. De acordo com Fiat USA (2016), a conversão da energia ocorre quando se pressiona o freio, ou quando se retira o pé do acelerador, a uma velocidade superior a 8 mph (≈ 13 km/h).

Visando estender o range da bateria, o manual do automóvel (Fiat, 2015) recomenda aos motoristas algumas ações a serem realizadas, visando reduzir o consumo de energia da bateria de alta tensão. Dentre as recomendações estão acionar o aquecimento/resfriamento (ar condicionado) com o veículo ainda conectado à fonte de carregamento e, sempre que possível, escolher percursos onde se consiga manter uma velocidade constante.

5. RECARGA DO FIAT 500E

Neste capítulo foram analisados os dados referente ao consumo e desempenho do Fiat 500e. Com base nos dados obtidos, foram propostos três cenários de recarga para uma futura análise do impacto do veículo elétrico no sistema elétrico. Os parâmetros elétricos medidos, durante a recarga do veículo, foram analisados, embasados em normas que se referem à qualidade de energia.

5.1. Desempenho energético do Fiat 500e

Pelo ponto de vista do Sistema Elétrico de Potência (SEP), o VE é mais uma carga a ser suprida pelo sistema e o aumento das vendas nos últimos anos pode provocar mudanças profundas no consumo da energia elétrica. O impacto provocado na rede elétrica está diretamente relacionado ao desempenho do VE, pois quanto menor a autonomia do veículo, mais recargas serão necessárias, muitas vezes sem o devido planejamento. Quanto maior o consumo de energia, maior impacto será causado no sistema elétrico (Cortezzi e Jota, 2017).

O desempenho de um VE não depende apenas da bateria instalada. Na prática, depende de diversos fatores como o estilo de direção, velocidade, condições do trânsito e da via, dentre outros. Para avaliar a eficiência de um veículo, seja elétrico, híbrido ou a combustão, são utilizados ciclos de direção.

Em um ciclo de direção padrão são aplicadas acelerações, frenagens e velocidades padronizadas dentro de um determinado intervalo de tempo. Os ciclos de direção mais utilizados nos veículos elétricos são os definidos pela Agência de Proteção Ambiental Americana (EPA - *US Environmental Protection Agency*). O ciclo de direção UDDS (*Urban Dynamometer Driving Schedule*) é um ciclo de direção onde se simula, com o veículo em um rolo dinamométrico, as condições de direção nos centros urbanos. O ciclo de direção HWFET (*Highway Fuel Economy Driving Schedule*) simula as condições de direção em estradas e rodovias. Os ciclos de direção são aplicados para avaliar o consumo de combustível e no caso do VE, o desempenho do veículo, seja por distância percorrida (km/L ou km/Wh) ou por unidade de tempo (L/h ou Wh/h) (EPA, 2016).

O ciclo urbano UDDS possui duração de 1369 segundos com velocidade média de 31,5 km/h e o comportamento do ciclo é apresentado na Figura 44. A Figura 45 demonstra o comportamento do ciclo de estrada HWFET, que possui duração de 765 segundos com velocidade média de 77,7 km/h (EPA, 2016).

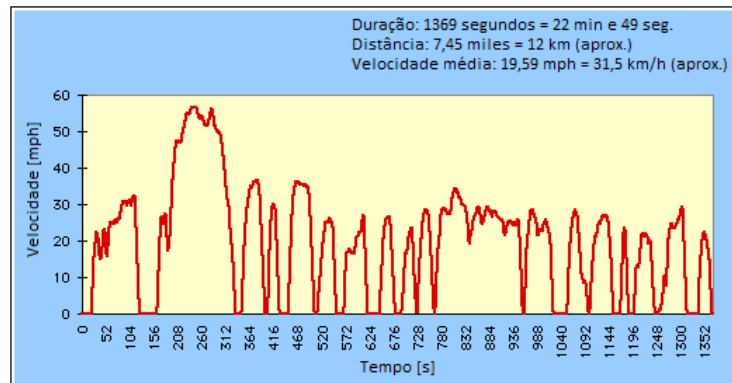


Figura 44: Ciclo de direção urbano UDDS

Fonte: EPA, 2016

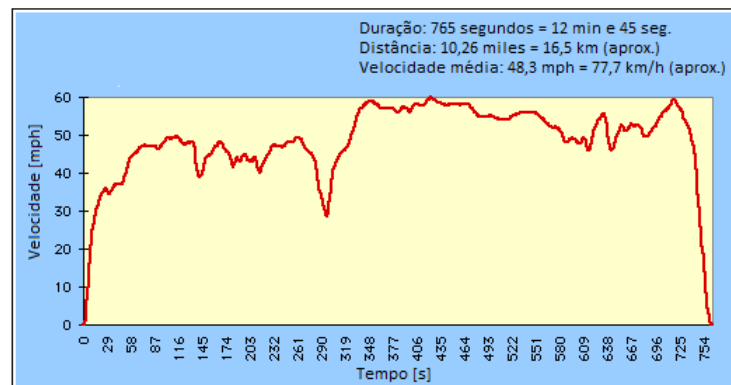


Figura 45: Ciclo de direção de estrada HWFET

Fonte: EPA, 2016

Nos ciclos de direção UDDS e HWFET, o Fiat 500e apresentou desempenho de 121/103 MPGe (milhas por galão) (Fiat USA, 2016). A autonomia do Fiat 500e não difere muito do Nissan Leaf, veículo elétrico mais vendido no mundo, que possui desempenho de 129/102 MPGe (UDDS/HWFET) (Nissan, 2016). A Tabela 13 apresenta os valores de desempenho do Fiat 500 convertidos de MPGe para km/l e km/kWh. A autonomia maior no ciclo urbano se deve ao maior uso do freio ou à baixa aceleração. Durante a frenagem, a RBS

devolve parte da energia cinética ao banco de baterias, aumentando a autonomia do veículo. É importante destacar que quanto maior a aceleração, maior o consumo da energia da bateria.

Tabela 13: Conversão da autonomia do Fiat 500e

Desempenho			
Ciclo de direção UDDS	121 MPGe	51,44 km/l	5,78 km/kWh
Ciclo de direção HWFET	103 MPGe	43,79 km/l	4,92 km/kWh

Fonte: U. S. Department of Energy (2014) e Fiat USA (2016)

O custo de combustível por km de um VE pode ser muito inferior ao de um veículo MCI. De acordo com o levantamento de preços da Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Bicomcombustíveis (ANP), o preço médio do litro da gasolina é R\$ 3,736 e do álcool etanol é R\$ 2,870 (na cidade de Belo Horizonte, de 8 a 14/01/2017). Considerando um veículo MCI com desempenho de 12,5 km/L, o custo do km utilizando gasolina é de R\$ 0,30 enquanto utilizando etanol o custo do km é de R\$ 0,23 (ANP, 2017).

Considerando a tarifa da Cemig, praticada em Janeiro/2017 acrescida de impostos, onde o preço do kWh é de R\$ 0,81 para consumidores residenciais (Grupo B1 Residencial e B3) e o desempenho do Fiat 500e de 5,78 km/kWh (Tabela 13), o custo do km do veículo é de R\$ 0,14. Há uma redução de 53,33% em relação ao valor do km do veículo abastecido à gasolina e 39,13% em relação ao valor do km do veículo abastecido a etanol (CEMIG, 2017a).

O Fiat 500e sendo abastecido no Brasil gastaria R\$ 12,38 para percorrer sua autonomia total de 135 km enquanto um veículo MCI a gasolina, com desempenho de 12,5 km/L, gastaria R\$ 40,50 para percorrer a mesma distância.

5.2. Comportamento da recarga do Fiat 500e

De acordo com Choi (2016), de 2014 até maio de 2016 foram vendidas cerca de 13.000 unidades do Fiat 500e nos Estados Unidos. A partir desta informação é possível

afirmar que já é realidade a presença de VEs consumindo energia do SEP para realizarem suas recargas.

O VE é uma carga eletroeletrônica e sua recarga sem controle pode ocasionar perdas no sistema de distribuição, desvio de tensão, gerar distorções harmônicas e injeção de potência reativa na rede (Rodriguez *et al.* 2013). Berger e Iniewski (2012) reforçam que a solução é a instalação de uma infraestrutura de medição avançada (*Smart Grids*). Em uma *Smart Grid*, medidores inteligentes seriam capazes de detectar sobrecargas no sistema, realizar o gerenciamento da recarga, que poderia ser programada para fora do período de alto consumo, e gerenciar a tarifação diferenciada, que impactaria diretamente sobre o comportamento do consumo de energia por parte do consumidor.

De acordo com Berger e Iniewski (2012), a preferência pelo Nível 2 (240V) de carregamento de um VE deve prevalecer, devido ao menor tempo de recarga. O carregamento em Nível 2, de acordo com os autores, pode chegar a dobrar o consumo de energia de uma residência, nas horas noturnas de maior consumo. Vários domicílios, conectados a um mesmo transformador, recarregando seus VEs em Nível 2, pode ir ao encontro com as limitações da capacidade dos transformadores de distribuição, que podem ser sobrecarregados, provocando a redução da vida útil do equipamento e colocando em risco a operação dos mesmos. Normalmente estes transformadores já trabalham com sobrecargas temporárias nos horários de ponta e a entrada de novas cargas pode agravar esta situação.

Uma das preocupações a respeito do carregamento do VE é sobre a injeção de distorção harmônica no sistema elétrico. Para a análise dos parâmetros elétricos obtidos, durante a recarga do Fiat 500e, foram consultadas três normas relacionadas à Qualidade de Energia, sendo duas internacionais e uma nacional. As normas IEEE 519-2014 e IEC 61000-3-2:2014 são as normas internacionais mais utilizadas mundialmente. No Brasil, os Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST), elaborados pela ANEEL, são as mais utilizadas no país (Cortezzi e Jota, 2017).

A IEEE 519-2014 (*IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems*) é uma norma americana que estabelece limites de distorção harmônica de tensão e corrente, fornecida à rede no ponto de acoplamento comum (PCC – *Point of Common Coupling*), onde outros equipamentos estão, ou podem estar,

conectados. O PCC é um ponto localizado a jusante da instalação considerada, onde o usuário se conecta com a concessionária. Para o PCC com tensão inferior a 1 kV, a norma determina que a Distorção Harmônica Total de Tensão (DHT_v) seja de até 8%. Para usuários conectados ao sistema onde a tensão no PCC está entre 120 V e 69 kV, a máxima Distorção Harmônica Total de Corrente (DHT_i) é de 5%. A norma salienta que os limites recomendados aplicam-se apenas no PCC e não deve ser aplicado a equipamentos individuais ou em locais dentro das instalações de um usuário (IEEE, 2014). Devido a isto, os valores recomendados por esta norma não serão considerados na análise dos dados medidos durante a recarga do Fiat 500e.

A norma europeia IEC 61000-3-2:2014 *Limits for Harmonic Current Emissions* especifica limites de corrente harmônica injetada na rede de distribuição por equipamentos, elétricos e eletrônicos, com corrente de entrada de até 16 A por fase. A norma IEC 61000 determina limites de DHT_i para cargas individuais considerando suas características e topologias, classificando-as em quatro classes, de A até D (IEC, 2014).

- Classe A: Equipamentos trifásicos, ferramentas fixas, equipamentos de áudio e outros equipamentos não classificados como B, C ou D;
- Classe B: Ferramentas portáteis, equipamentos de solda não profissionais;
- Classe C: Equipamentos de iluminação;
- Classe D: Equipamentos com potência inferior a 600 W como computador, tablet, televisão.

O Fiat 500e foi considerado da classe A por não se incluir nas demais classes descritas pela norma IEC 61000 (Cortezzi e Jota, 2017). Para a classe A, a norma limita a DHT_i no valor absoluto de 2,3 A, o que equivale a 14% da corrente máxima de entrada (16 A) (IEC, 2014).

A norma PRODIST Módulo 8 estabelece limites de DHT_v e FP. Para DHT_i não há limites estabelecidos na norma. O PRODIST Módulo 8 determina que, para tensão nominal do barramento $V_N \leq 1$ kV, a DHT_v seja de até 10%. Para unidades consumidoras com tensão inferior a 230 kV, o FP esteja compreendido entre 1 e 0,92, seja para valor indutivo ou

capacitivo (ANEEL, 2016a). Lembrando que FP indutivo assume valores positivos e FP capacitivo assume valores negativos.

Para avaliar o comportamento da recarga do VE Fiat 500e, o veículo foi submetido à recarga no Nível 2 de carregamento, em 220 V (AC) e 60 Hz, utilizando o EVSE portátil fornecido juntamente com o veículo. A escolha pelo EVSE portátil foi devido à maior frequência por este tipo de recarga, visto que nem todos os usuários irão adquirir a estação de carregamento nas concessionárias autorizadas.

O EVSE portátil, ilustrado na Figura 46, foi conectado ao veículo pelo conector SAE J1772. A conexão com a rede elétrica ocorreu por meio do *plug* NEMA 5-15 de 3 pinos, que foi conectado a uma tomada padrão CA aterrada.



Figura 46: EVSE portátil do Fiat 500e
Fonte: Próprio autor

A medição foi realizada utilizando o medidor digital DMG210, do fabricante italiano Lovato Electric, ilustrado na Figura 47. Os dados técnicos do medidor DMG210 encontram-se na Tabela 14.

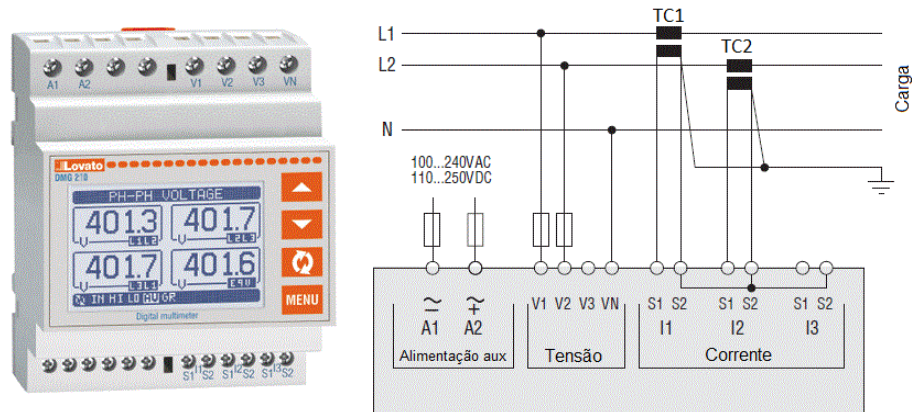


Figura 47: Medidor DMG210

Fonte: Lovato Electric, 2016

Tabela 14: Características técnicas do medidor DMG210

DMG210	
Temperatura de operação	-20 a +60 °C
Frequência de operação	45 - 66 Hz
Faixa de medição de tensão	10 - 480 V ~ L-N
	20 - 830 V ~ L-L
Faixa de medição de corrente	0,010 - 6 A
Exatidão de tensão	±0,5% ±0,5% dígito
Exatidão de corrente	±0,5% ±0,5% dígito

Fonte: Elaboração própria do autor

A Tabela 15 lista os parâmetros elétricos medidos pelo DMG210 durante a recarga do Fiat 500e. Os dados obtidos são referentes às medições entre fase-fase (L1-L2) e entre fase-neutro (L1-N e L2-N).

A recarga de um VE será realizada sempre que possível, devido à preocupação com a disponibilidade do veículo. Sendo assim, os ciclos rasos de recarga são bem mais frequentes que os ciclos profundos. É preciso conhecer o consumo diário de um VE para analisar o comportamento da recarga no SEP.

Tabela 15: Parâmetros elétricos medidos pelo medidor DMG210

Tensão	V	[V]
Corrente	I	[A]
Distorção Harmônica Total de Tensão	DHTv	[%]
Distorção Harmônica Total de Corrente	DHTi	[%]
Potência Ativa	P	[kW]
Potência Reativa	Q	[kVar]
Potência Aparente	S	[kVA]
Fator de Potência	FP	Adimensional

Fonte: Elaboração própria do autor

De acordo com a Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB), a quilometragem média de 15000 km/ano deve ser adotada como valor característico para veículos leves “flex” com até 8 anos de fabricação (CETESB, 2013). A partir da quilometragem média anual, considera-se que os veículos leves rodam, em média, 41 km/dia.

No ciclo de direção urbano UDDS, o Fiat 500e apresentou desempenho de 121 MPGe, que é equivalente a 5,78 km/kWh (U. S. Department of Energy, 2014). Considerando a quilometragem diária de 41 km/dia, o consumo da bateria do automóvel, em um dia, é de 7,1 kWh. A bateria do Fiat 500e possui 24 kWh de energia, o que corresponde a 100% SOC. Ao fim do dia, após rodar 41 km, será consumido 7,09 kWh e a carga da bateria estará com 70% SOC (Cortezzi e Jota, 2017).

Considerando a quilometragem diária de 41 km, serão considerados os seguintes perfis de recarga de VEs, divididos em três cenários:

- Cenário 1 (C1) será composto pelos motoristas que saem do trabalho às 18h, chegam em casa às 19h e imediatamente colocam seus VEs para recarregar em suas residências;
- Cenário 2 (C2) será composto pelos motoristas que saem do trabalho às 18h e chegam em casa às 19h porém, programam seus VEs para iniciar a recarga às 23h em suas residências;
- Cenário 3 (C3) será composto pelos motoristas que possuem postos de recarga próximos ao local de trabalho. Estes, ao chegar ao trabalho às 8h,

imediatamente colocam seus VEs para recarregar. Saem do trabalho às 18h e às 19h colocam seus VEs para recarregar em suas residências. Neste cenário ocorrerão dois momentos de recarga, ambos após a rodagem de 20,5 km.

Considerando os cenários propostos, foram utilizados dados de recarga do Fiat 500e com carga inicial de 70% SOC, para C1 e C2. Para C3 a recarga é iniciada com a carga inicial em 85% SOC, porém, como os dados disponíveis eram a cada 10% de carga adicional, foram utilizados dados da recarga iniciada em 80% SOC. A Figura 48 ilustra a medição realizada durante o carregamento do Fiat 500e, utilizando o medidor DMG210.



Figura 48: Carregamento do Fiat 500e

Fonte: Próprio autor

A medição dos dados da rede elétrica, utilizando o medidor DMG210, foi realizada no instante que o veículo foi conectado à rede e cada vez que o veículo atingia 10% de carga adicional, até atingir o carregamento completo. Assim que o veículo Fiat 500e atinge 100% SOC, a recarga é interrompida e a corrente de recarga vai a zero. Neste momento, o painel de instrumentos do veículo fornece a informação de carga completa de forma gráfica e em

porcentagem. O indicador de carga, localizado na parte superior do painel do veículo, também fornece a informação de carga completa através do acendimento das cinco luzes no painel.

A recarga foi realizada no Nível 2 de carregamento, na tensão de 220 V (AC) fase-fase e 60 Hz. O tempo total de recarga do Fiat 500e foi de 3 horas e 4 minutos, para a bateria com carga inicial de 70% SOC, e 1 hora e 52 minutos, para a bateria com carga inicial de 80% SOC, conforme mostrado na Tabela 15.

Tabela 16: Tempo de recarga do Fiat 500e

Carga inicial	Tempo de recarga [h:min]			
	70%	80%	90%	100%
70%	00h00min	01h15min	02h16min	03h04min
80%	-	00h00min	00h59min	01h52min

Fonte: Elaboração própria do autor

Em C1, o motorista sai de casa às 7 h e chega ao trabalho às 8 h, percorrendo metade do percurso e respectivamente, consumindo metade da carga gasta em um dia. O veículo permanece estacionado durante todo o horário de trabalho. O motorista sai do trabalho às 18 h e chega em casa às 19h, colocando imediatamente o veículo para recarregar. A recarga é iniciada com a bateria em 70% SOC e concluída após 03h04min de carregamento, conforme observado na Figura 49.

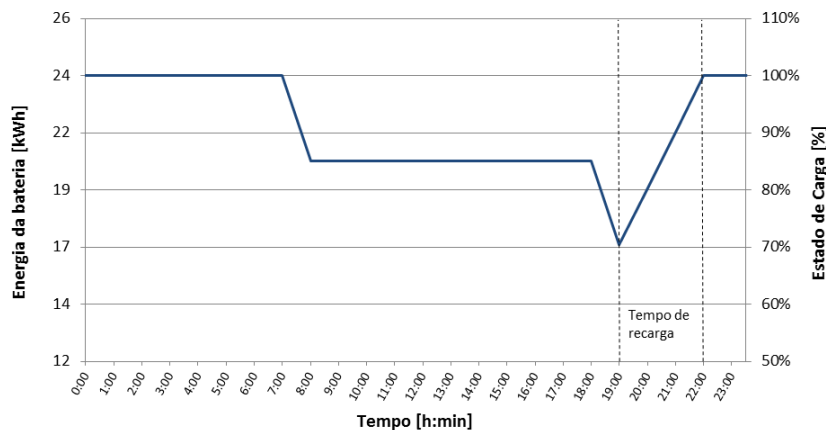


Figura 49: Cenário 1 de recarga

Fonte: Elaboração própria do autor

Em C2, o motorista sai de casa às 7 h e chega ao trabalho às 8 h, percorrendo metade do percurso e respectivamente, consumindo metade da carga gasta em um dia. O veículo permanece estacionado durante todo o horário de trabalho. O motorista sai do trabalho às 18 h e chega em casa às 19 h, porém o veículo é programado para iniciar a recarga às 23 h. A recarga é iniciada com a bateria em 70% SOC e concluída após 03h04min de carregamento, conforme observado na Figura 50.

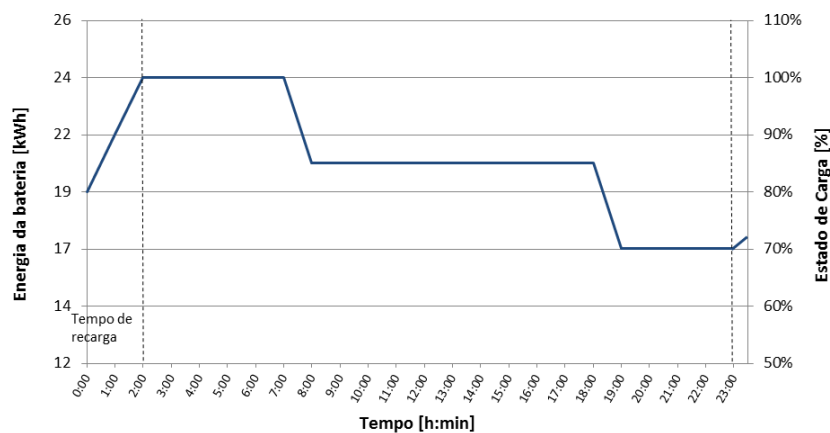


Figura 50: Cenário 2 de recarga
Fonte: Elaboração própria do autor

Em C3, a recarga do veículo ocorre em dois momentos do dia. O motorista sai de casa às 7 h e chega ao trabalho às 8 h, percorrendo metade do percurso e respectivamente, consumindo metade da carga gasta em um dia. Ao chegar ao trabalho às 8 h, o veículo é imediatamente colocado para recarregar em postos de recarga próximos ao local de trabalho. O veículo permanece estacionado durante todo o horário de trabalho com carga completa (100% SOC). Quando o motorista sai do trabalho às 18 h e chega em casa às 19 h ocorre a segunda recarga, desta vez, realizada na residência. Em ambos os casos, a recarga é iniciada com a bateria em 80% SOC e concluída após 01h52min de carregamento, conforme observado na Figura 51.

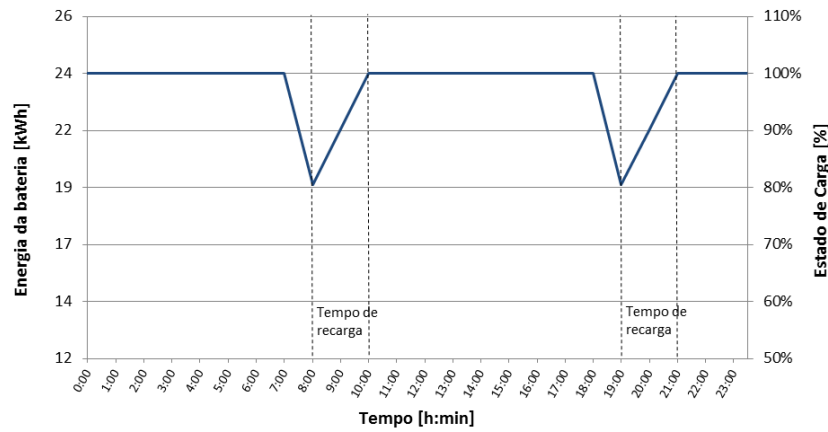


Figura 51: Cenário 3 de recarga
 Fonte: Elaboração própria do autor

5.2.1. Recarga inicial em 70% SOC

Para avaliar o impacto do consumo nos cenários 1 e 2, foi realizada a medição dos parâmetros elétricos durante a recarga do Fiat 500e, utilizando o medidor DMG210, com a bateria com carga inicial em 70% SOC. Na Figura 52 está a medição da tensão e da DHTv entre fase-fase (L1-L2). Nas Figuras 53 e 54 se encontram o comportamento da tensão e da DHTv entre fase-neutro, nas fases L1 e L2, respectivamente.

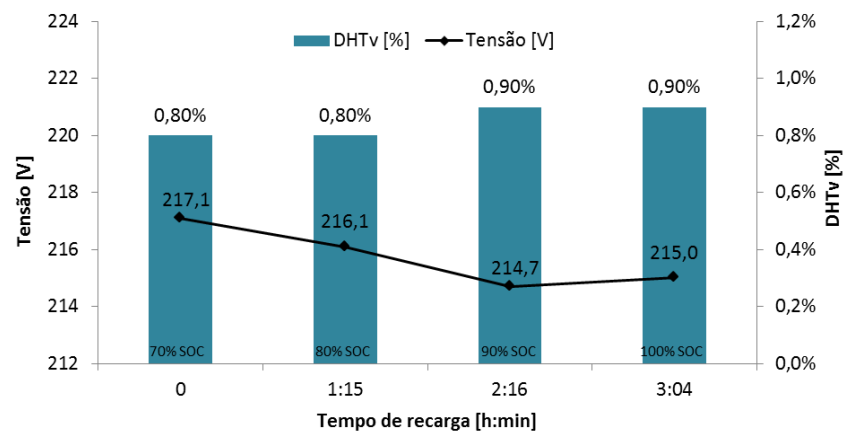


Figura 52: Tensão e DHTv entre L1-L2, durante recarga iniciada em 70% SOC
 Fonte: Elaboração própria do autor

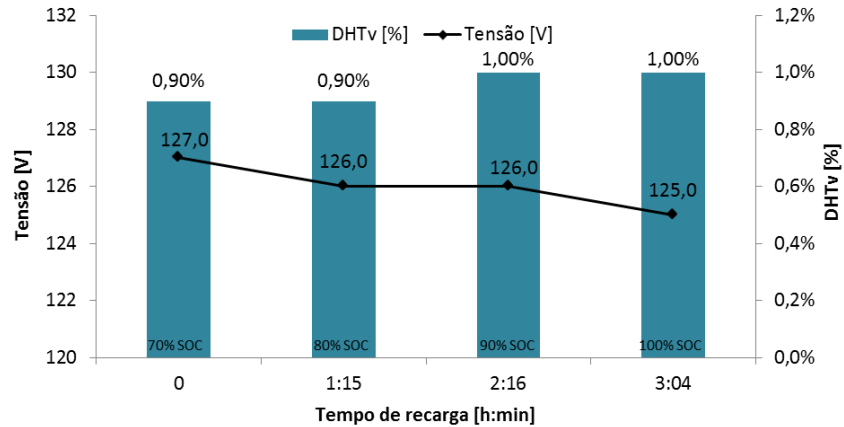


Figura 53: Tensão e DHTv em L1, durante recarga iniciada em 70% SOC

Fonte: Elaboração própria do autor

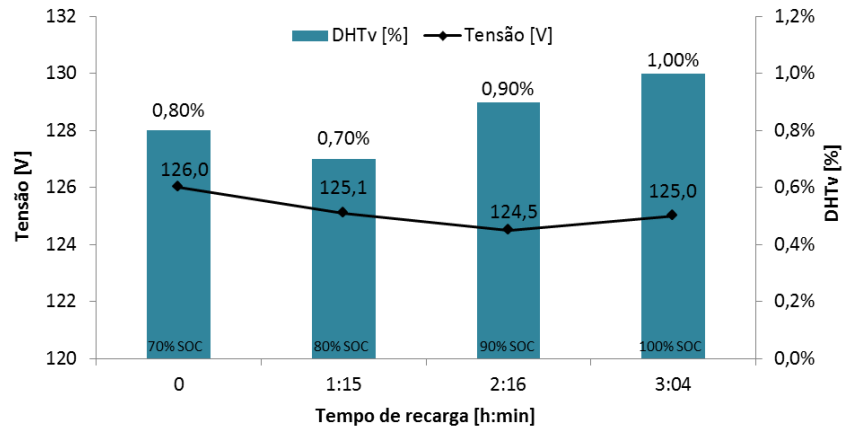


Figura 54: Tensão e DHTv em L2, durante recarga iniciada em 70% SOC

Fonte: Elaboração própria do autor

Ao analisar o comportamento da tensão, entre fases (L1-L2) a variação de tensão foi de 1,1% e a maior variação de tensão encontrada foi em L1 de 1,58%. A maior distorção harmônica total de tensão (DHTv) entre fases foi de 0,9% e nas fases L1 e L2 foi de 1%. Os valores encontrados são inferiores aos valores especificados pela norma PRODIST Módulo 8 e por isso atendem à norma brasileira que limita a DHTv em 10%. A medição da corrente e da DHTi nas fases L1 e L2 também foi realizada e os resultados obtidos se encontram nas Figuras 55 e 56, respectivamente.

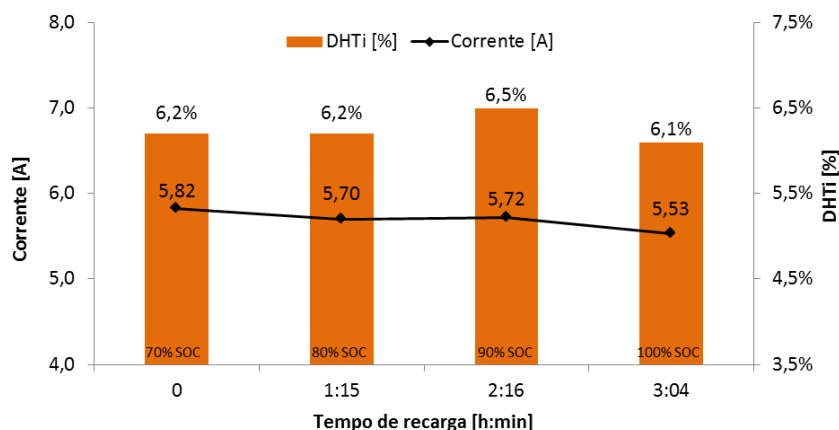


Figura 55: Corrente e DHTi em L1, durante recarga iniciada em 70% SOC
 Fonte: Elaboração própria do autor

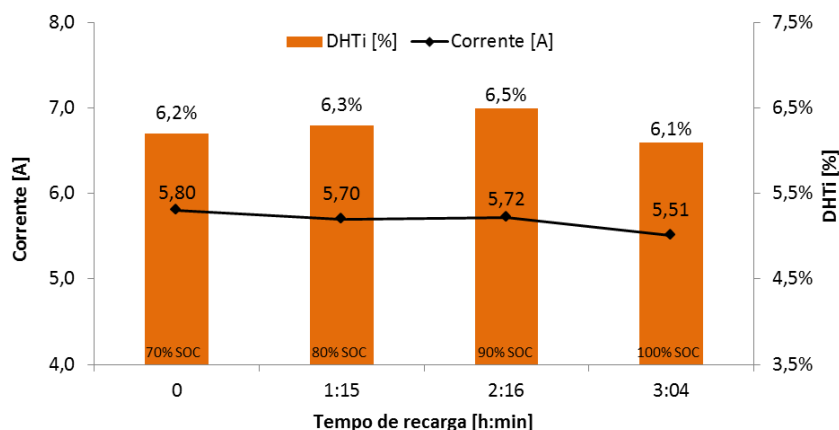


Figura 56: Corrente e DHTi em L2, durante recarga iniciada em 70% SOC
 Fonte: Elaboração própria do autor

Ao analisar o comportamento da corrente, o maior valor encontrado de DHTi foi de 6,5% em ambas as fases, o que corresponde a 0,37 A. Os valores encontrados atendem à norma IEC 61000-3-2:2014 que limita a DHTi em 2,3 A.

O fator de potência e as potências P, Q e S foram medidos em entre as fases L1-L2 e entre cada fase e neutro, durante a recarga do Fiat 500e com a bateria com carga inicial de 70% SOC. O comportamento das potências e do FP entre fases (L1-L2) é apresentado na Figura 57. O resultado das medições nas fases L1 e L2 encontram-se nas Figuras 58 e 59, respectivamente.

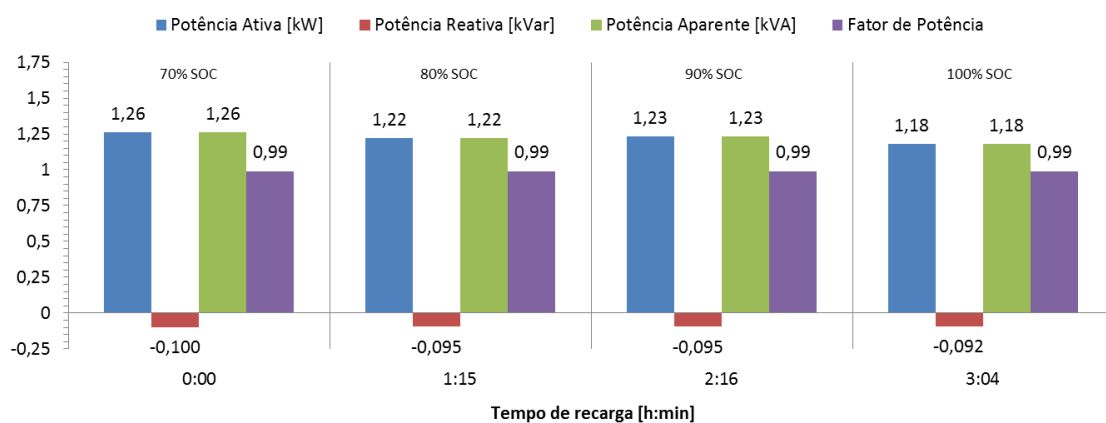


Figura 57: Potências P, Q, S e FP entre L1-L2, durante recarga iniciada em 70% SOC
 Fonte: Elaboração própria do autor

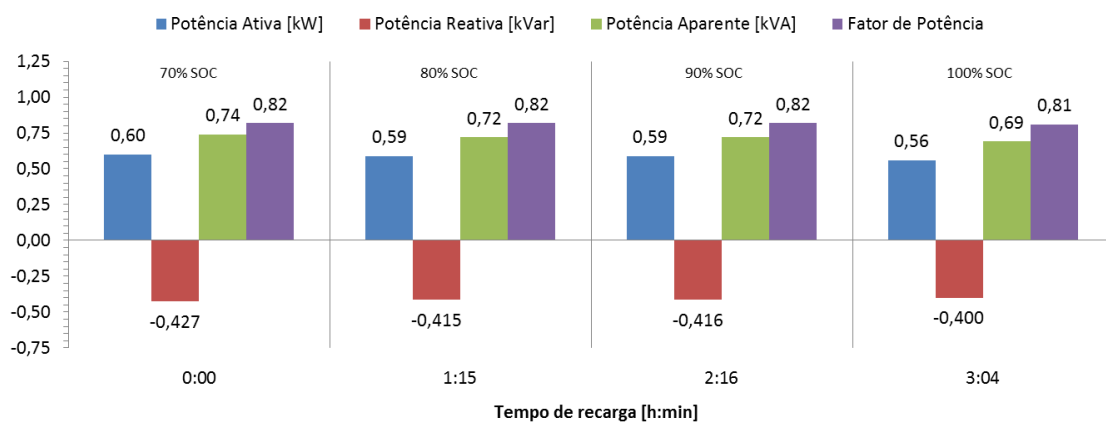


Figura 58: Potências P, Q, S e FP em L1, durante recarga iniciada em 70% SOC
 Fonte: Elaboração própria do autor

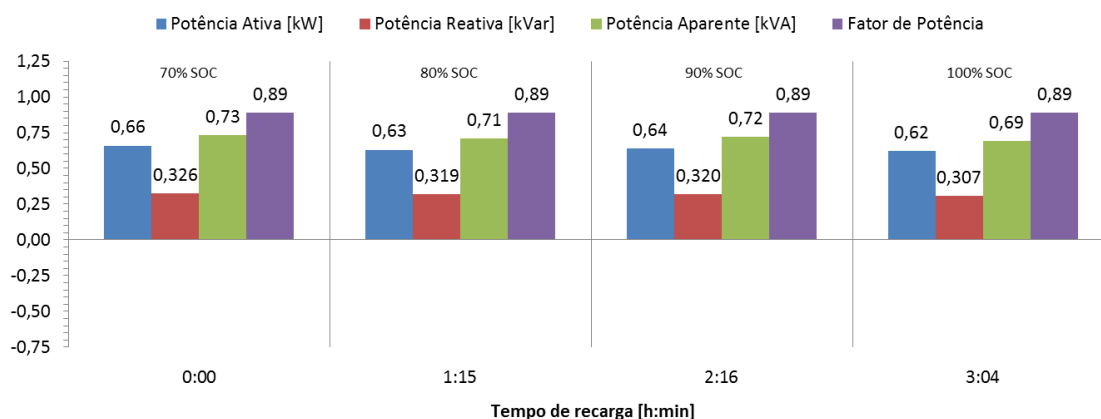


Figura 59: Potências P, Q, S e FP em L2, durante recarga iniciada em 70% SOC

Fonte: Elaboração própria do autor

Durante a recarga do Fiat 500e, com a bateria com carga inicial de 70% SOC, foram encontrados valores de FP inferiores aos valores especificados pela norma PRODIST Módulo 8, que limita em $1 \leq FP \leq 0,92$ (indutivo ou capacitivo). Ao analisar os resultados obtidos na fase L1 é observado o alto valor negativo de potência reativa, característica dos carregadores de bateria devido ao comportamento capacitivo. Na fase L2, o valor da potência reativa foi positivo, apresentando uma característica típica de compensação de potência reativa de dispositivos eletrônicos, já que é cobrado o excedente de potência reativa quando o valor apresentado está fora do limite permitido. O FP total apresentou valores dentro do aceitável pelo PRODIST Módulo 8. Devido a isto, o consumo médio de potência ativa foi de 1,22 kW podendo ser considerado o mesmo para a potência aparente (1,22 kVA).

5.2.2. Recarga inicial em 80% SOC

Para avaliar o impacto do consumo no cenário 3, foi realizada uma segunda medição dos parâmetros elétricos durante a recarga do Fiat 500e, utilizando o DMG210, com a bateria com carga inicial em 80% SOC. O comportamento da tensão e da DHTv entre fase-fase (L1-L2) é apresentado na Figura 60. A medição da tensão e da DHTv nas fases L1 e L2 se encontram nas Figuras 61 e 62, respectivamente.

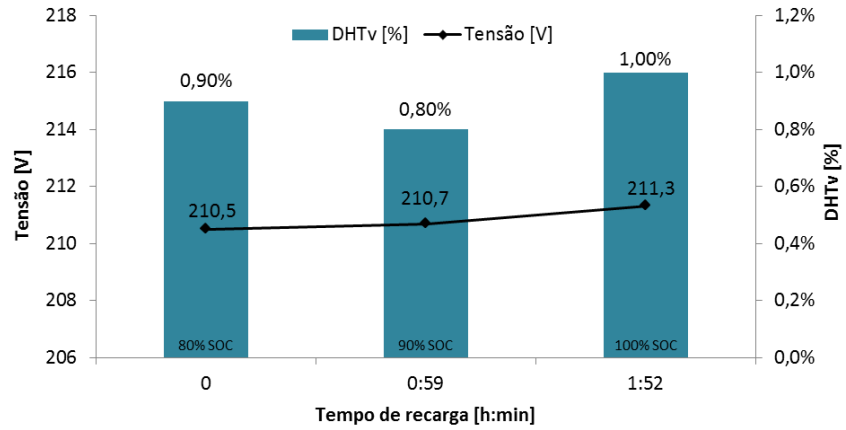


Figura 60: Tensão e DHTv entre L1-L2, durante recarga iniciada em 80% SOC
 Fonte: Elaboração própria do autor

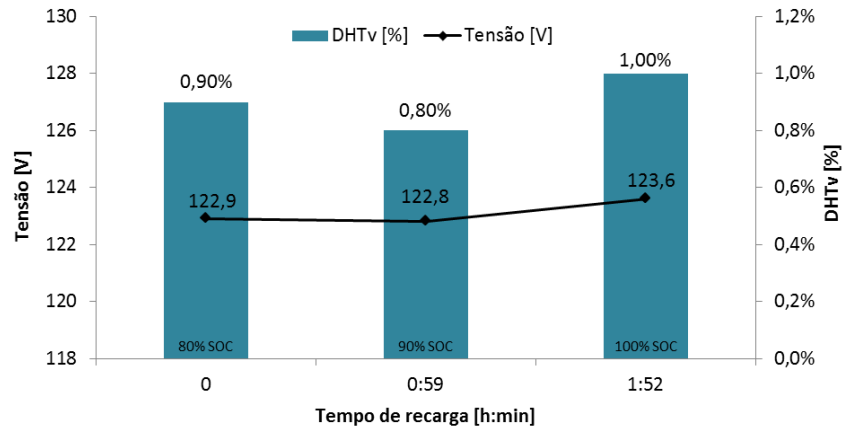


Figura 61: Tensão e DHTv em L1, durante recarga iniciada em 80% SOC
 Fonte: Elaboração própria do autor

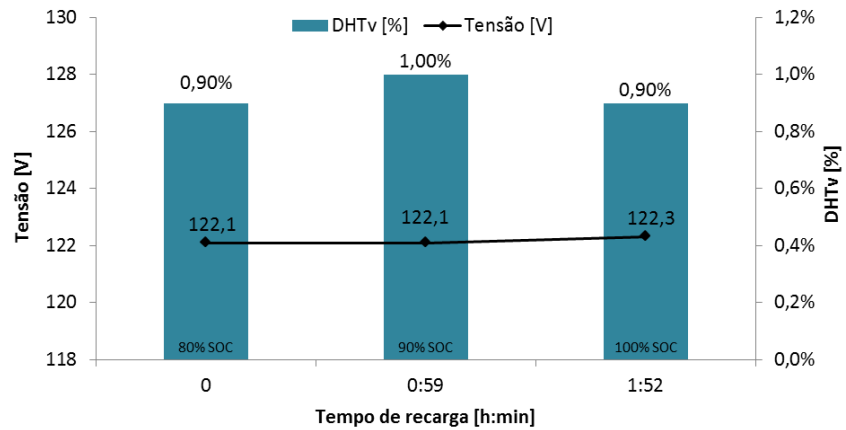


Figura 62: Tensão e DHTv em L2, durante recarga iniciada em 80% SOC
 Fonte: Elaboração própria do autor

A variação de tensão encontrada durante a recarga iniciando em 80% SOC foi ainda menor que o valor encontrado na recarga iniciando em 70% SOC. Entre fases (L1-L2) a variação de tensão foi de 0,38% e a maior variação de tensão foi de 0,64% na fase L1. A maior distorção harmônica total de tensão (DHTv) entre fases foi de 0,8% e nas fases L1 e L2 foi de 1%. Os valores de DHTv medidos durante a recarga estão inferiores ao especificado pela norma PRODIST Módulo 8 por isso atendem à norma. Foi realizada a medição de corrente e da DHTi nas fases L1 e L2 e os valores encontrados são apresentados nas Figuras 63 e 64, respectivamente.

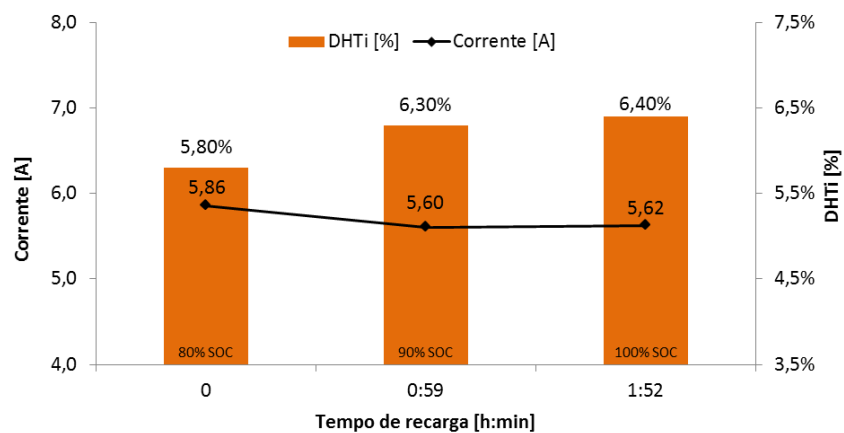


Figura 63: Corrente e DHTi em L1, durante recarga iniciada em 80% SOC
Fonte: Elaboração própria do autor

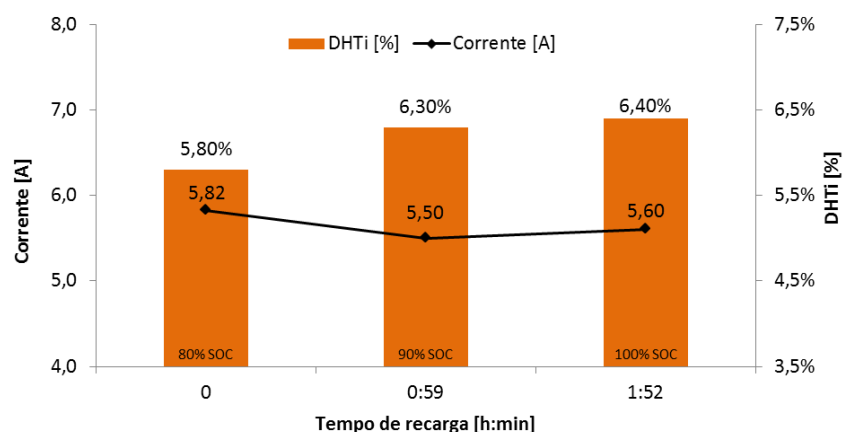


Figura 64: Corrente e DHTi em L2, durante recarga iniciada em 80% SOC
Fonte: Elaboração própria do autor

Ao analisar o comportamento da corrente, o maior valor encontrado de DHTi também foi inferior ao encontrado durante a recarga iniciada em 70% SOC. O maior DHTi foi de 6,4% em ambas as fases, o que corresponde a 0,36 A. Os valores encontrados estão abaixo do especificado pela norma IEC 61000-3-2:2014, que limita a DHTi em 2,3 A, e por isso atendem à norma consultada.

Durante a recarga iniciada em 80% SOC, o fator de potência juntamente com as potências P, Q e S foram medidas entre as fases L1-L2 e em cada fase L1 e L2, entre fase-neutro. Na Figura 65 está o comportamento das potências e do FP entre fases (L1-L2). O resultado das medições nas fases L1 e L2 encontram-se nas Figuras 66 e 67, respectivamente.

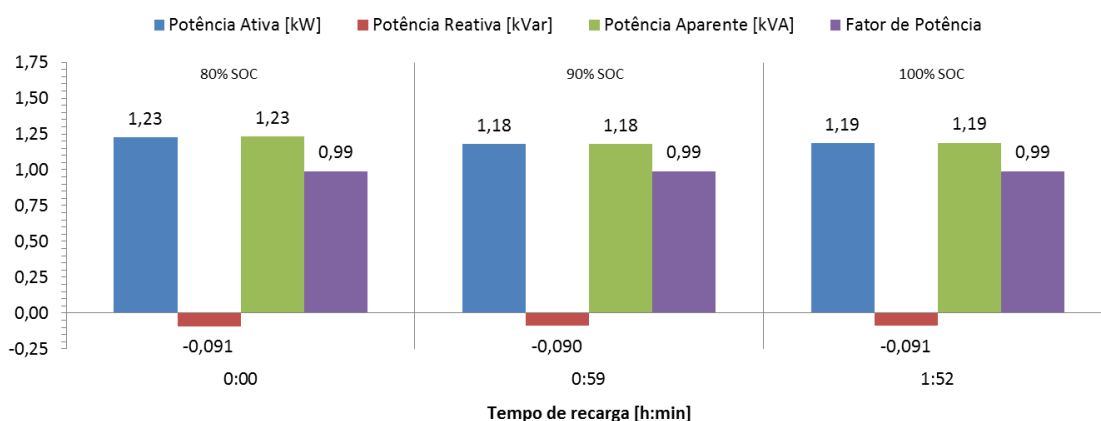


Figura 65: Potências P, Q, S e FP entre L1-L2, durante recarga iniciada em 80% SOC

Fonte: Elaboração própria do autor

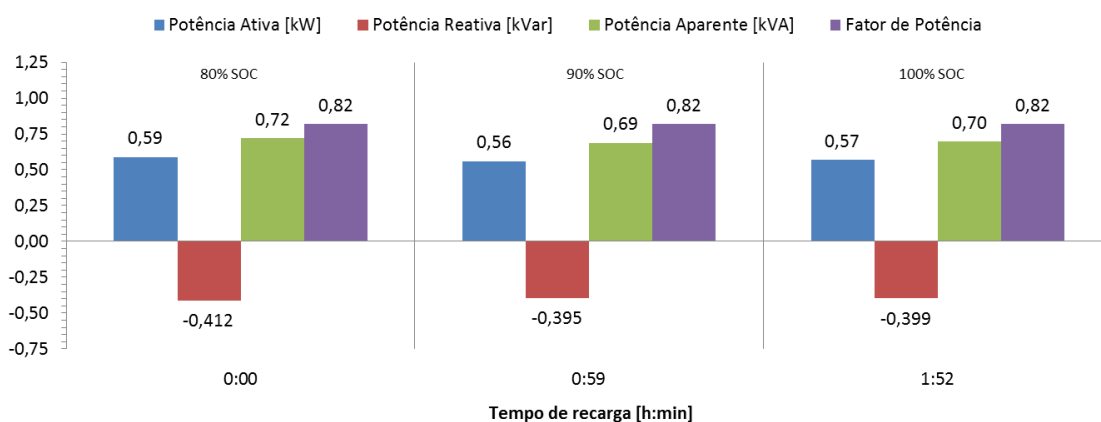


Figura 66: Potências P, Q, S e FP em L1, durante recarga iniciada em 80% SOC

Fonte: Elaboração própria do autor

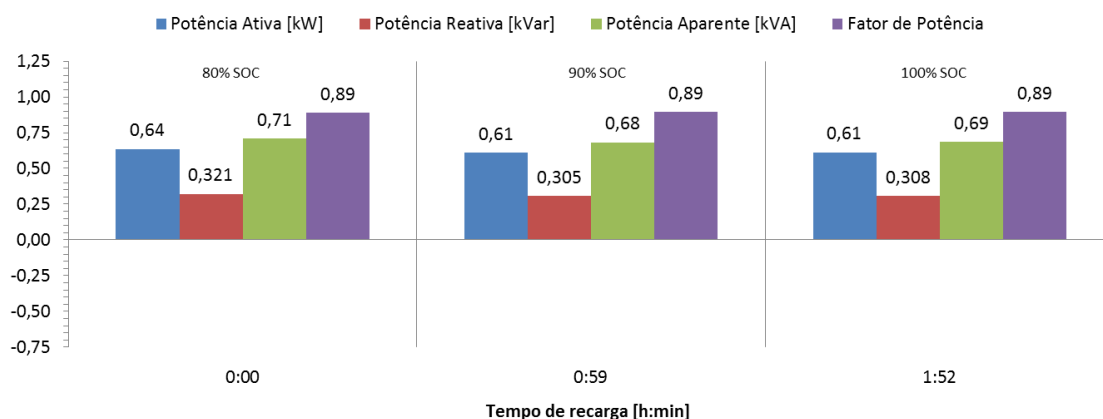


Figura 67: Potências P, Q, S e FP em L2, durante recarga iniciada em 80% SOC

Fonte: Elaboração própria do autor

Os valores encontrados de FP, durante a recarga do Fiat 500e com a bateria com carga inicial de 80% SOC, estavam inferiores aos valores especificados pela norma PRODIST Módulo 8, que limita em $1 \leq FP \leq 0,92$ (indutivo ou capacitivo).

O comportamento de alto valor negativo de potência reativa na fase L1 se repete, assim como aconteceu na recarga iniciada em 70% SOC. Conforme apresentado, carregadores de baterias possuem comportamento capacitivo, apresentando valores negativos de potência reativa. Na fase L2, o valor da potência reativa foi positivo, apresentando uma característica típica de compensação de potência reativa, levando o FP a valores dentro do aceitável pelo PRODIST Módulo 8. O consumo médio de potência ativa foi de 1,20 kW, valor bem próximo do valor encontrado durante a recarga iniciada em 70% SOC (1,22 kW).

6. ANÁLISE DO CONSUMO DO FIAT 500E NO SISTEMA ELÉTRICO

De acordo com dados divulgados pelo Instituto de Estudos de Transporte (ITS – *Institute of Transportation Studies*) da Universidade da Califórnia a partir de uma pesquisa realizada, 83% dos domicílios que possuem um VE têm renda anual superior a US\$ 100 mil, 46% tem renda anual superior a US\$ 150 mil e apenas 3,8% dos domicílios pesquisados possuem o VE como único veículo de transporte da residência (ITS, 2013). Segundo a calculadora de renda familiar da Pew Research Center (2016), baseado nos valores encontrados de renda anual, a maioria dos proprietários de VE pertence à classe média e à classe alta.

No Brasil, as classes média e alta correspondem às classes B e A, respectivamente. A renda das classes sociais brasileiras é baseada no número de salários mínimos da renda familiar, onde a classe B possui renda superior a 10 salários mínimos e a classe A renda superior a 20 salários mínimos (IBGE, 2017 e FPA, 2013). Considerando o salário mínimo de 2017 no valor de R\$ 937,00, a classe B possui renda mensal superior a R\$ 9.370,00 e a classe A possui renda mensal superior a R\$ 18.740,00 (Brasil, 2016). Segundo Gerbelli (2016), 12,6% das famílias brasileiras pertencem à classe B e apenas 2% das famílias brasileiras pertencem à classe A.

Para a análise do impacto do consumo do Fiat 500e no sistema elétrico, foram utilizadas curvas de cargas típicas de consumidores, obtidas através de medições em circuitos de distribuição. As curvas de cargas utilizadas foram classificadas por Yamakawa (2007), como curva característica de uma residência de classe média, de classe alta e de um consumidor comercial. Os dados fornecidos pelo autor se referem aos valores de potência ativa e reativa, obtidos em intervalos de 10 minutos, ao longo de um dia. Todas as curvas de cargas se referem ao consumo durante os dias úteis da semana (Yamakawa, 2007).

A recarga do Fiat 500e, de acordo com os cenários ilustrados anteriormente nas Figuras 49, 50 e 51, provocará mudanças na curva de carga destes consumidores. A fim de analisar o impacto que um VE pode causar na curva de carga de consumidores brasileiros, os dados de potência ativa e reativa medidos durante a recarga do Fiat 500e foram inseridos nas curvas de cargas típicas de consumidores, em diferentes cenários de carregamento. Os

cenários C1 e C2 serão aplicados nas curvas de carga da residência de classe média e alta. Em C3, a recarga do Fiat 500e é realizada duas vezes ao longo do dia. A primeira recarga será aplicada na curva de carga do estabelecimento comercial no período da manhã e o segundo momento de recarga será aplicado às curvas de carga residenciais de classe média e alta. Os períodos de recarga a serem inseridos nas curvas de carga são apresentados na Tabela 16.

Tabela 17: Cenários de recarga do Fiat 500e

Cenários	Tipo de recarga	Tempo de recarga	Horário da recarga	Curvas aplicadas
C1	$70\% \leq \text{SOC} \leq 100\%$	03h04min	19h às 22h04min	Classe média / alta
C2	$70\% \leq \text{SOC} \leq 100\%$	03h04min	23h às 02h04min	Classe média / alta
C3	$80\% \leq \text{SOC} \leq 100\%$	01h52min	08h às 09h52min	Comercial
			19h às 20h52min	Classe média / alta

Fonte: Elaboração própria do autor

A curva de carga de uma residência de classe média é apresentada na Figura 68, de consumo mensal de 300 kWh/mês, o que corresponde a 10 kWh/dia e demanda máxima de 847 W. Na Figura 69 é apresentada a curva de carga de uma residência de classe alta, de consumo mensal de 500 kWh/mês, 16,67 kWh/dia e demanda máxima de 1,231 kW. Para o consumidor comercial foi considerado o consumo mensal de 1.800 kWh/mês, o que corresponde a 60 kWh/dia e demanda máxima de 3,874 kW, apresentado na Figura 70.

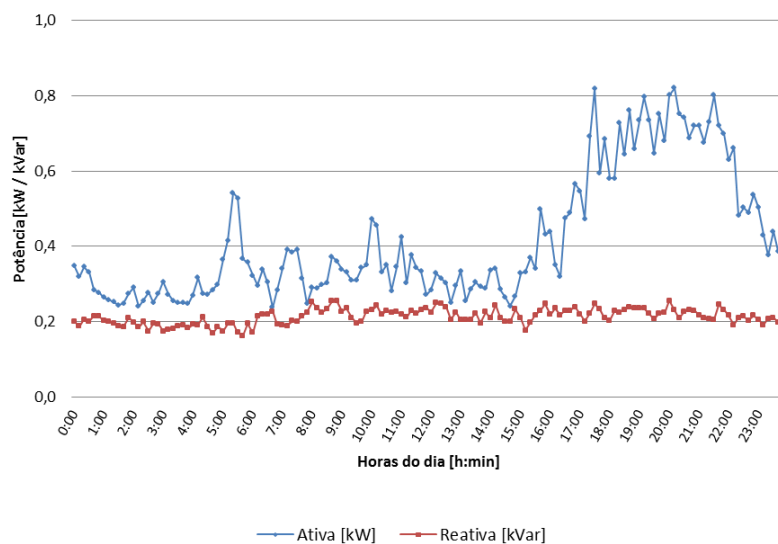


Figura 68: Curva de carga da residência de classe média em dias úteis
 Fonte: Yamakawa, 2007

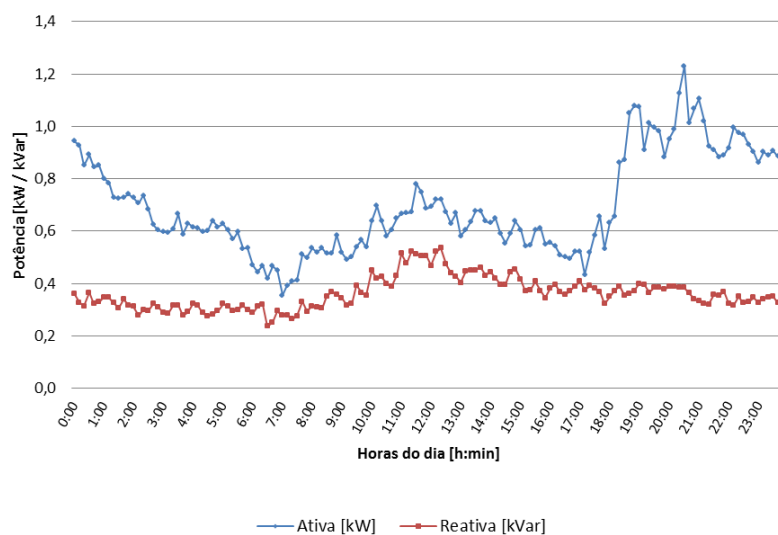


Figura 69: Curva de carga da residência de classe alta em dias úteis
 Fonte: Yamakawa, 2007

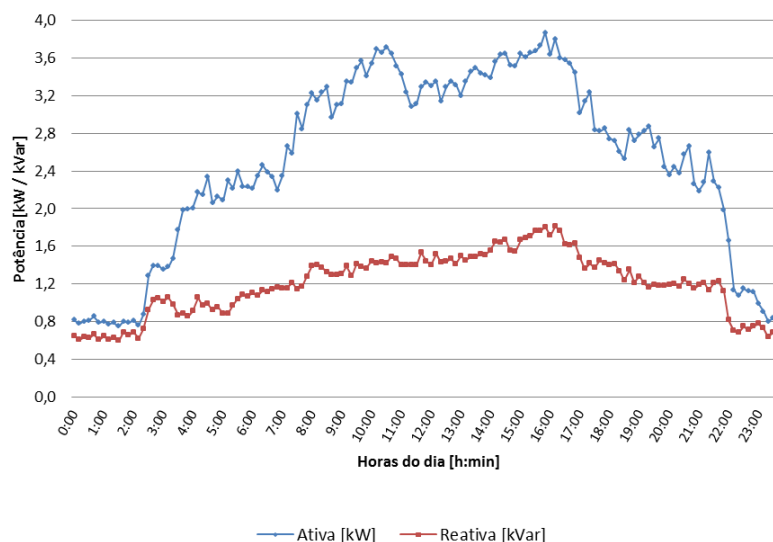


Figura 70: Curva de carga do estabelecimento comercial em dias úteis
 Fonte: Yamakawa, 2007

6.1. Consumo durante Cenário 1

No cenário 1 (C1), a recarga do Fiat 500e se inicia às 19 h, após o veículo percorrer 41 km. Após percorrer esta distância, a bateria do veículo se encontra em 70% SOC. Os dados de potência ativa e reativa, obtidos no capítulo anterior, serão inseridos nas curvas de carga das residências de classe média e alta para análise do impacto da recarga do veículo elétrico no consumo da residência.

6.1.1. Consumo da residência de classe média para o Cenário 1

Em C1, a recarga do Fiat 500e se inicia às 19 h com a bateria com carga inicial em 70% SOC. Em uma residência de classe média, a curva de carga apresentará um novo comportamento ao inserir a recarga do Fiat 500e, conforme observado na Figura 71. As Figuras 72 e 73 apresentam o comportamento em cada fase L1 e L2, entre fase-neutro, respectivamente.

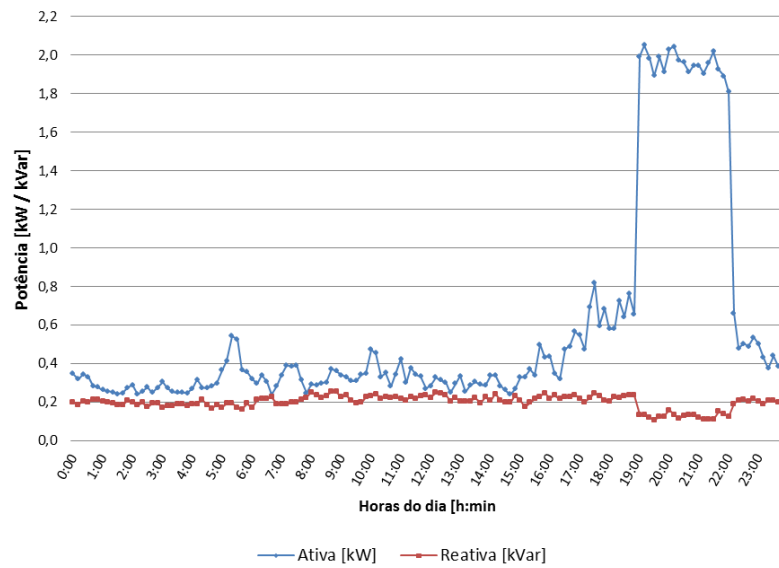


Figura 71: C1 - Curva da residência de classe média, entre fases (L1-L2)
 Fonte: Elaboração própria do autor

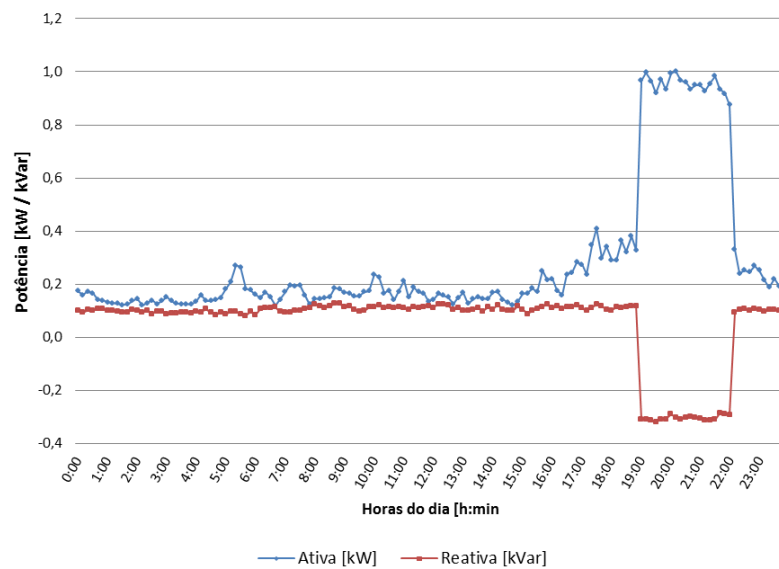


Figura 72: C1 - Curva da residência de classe média, na fase L1
 Fonte: Elaboração própria do autor

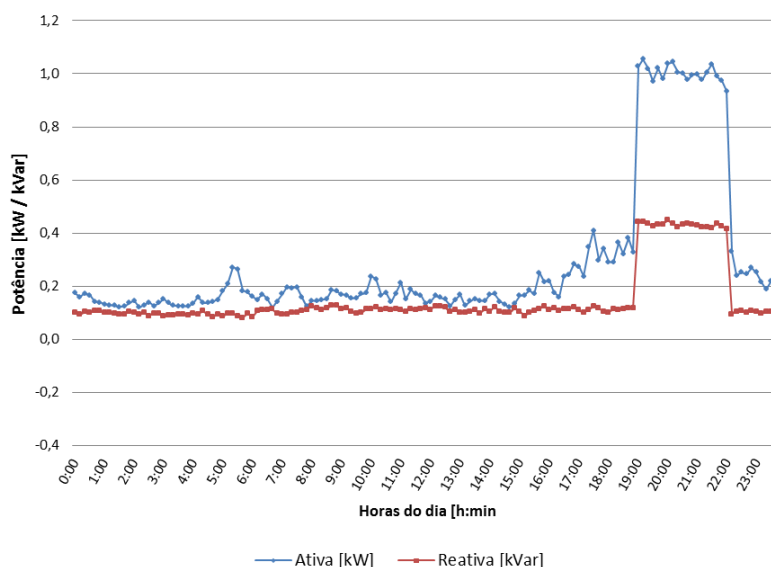


Figura 73: C1 - Curva da residência de classe média, na fase L2

Fonte: Elaboração própria do autor

Ao aplicar C1 na curva de carga da residência é possível perceber que ocorre uma significativa mudança no comportamento da curva de carga da residência durante o período de recarga do Fiat 500e. Conforme Tabela 17, o consumo diário de energia da residência, que era de 10 kWh, passou a ser de 13,89 kWh e o consumo mensal passou de 300 kWh para 416,55 kWh, ocasionando um aumento de 38,85%. Considerando a tarifa da Cemig (praticada em Janeiro/2017), a conta de energia da residência saltou de R\$ 243,00 para R\$ 337,41. No período da recarga, de 19h as 22h04, enquanto o consumo médio neste período era de 2,308 kWh, o consumo médio da residência passou para 6,193 kWh, quase três vezes maior.

No período da recarga do Fiat 500e em C1, a demanda máxima apresentou um aumento de 142,24%, indo de encontro com as limitações técnicas da capacidade dos transformadores de distribuição que já operam no período de ponta com temporárias sobrecargas.

No período de recarga do Fiat 500e, a potência reativa não apresentou significativas variações quando observado na curva de consumo entre fases (L1-L2). Porém, ao observar as curvas das fases L1 e L2 individualmente, há alto consumo de potência reativa em uma das fases, com compensação de reativo (injeção) na outra fase. O alto valor de potência reativa nas fases alerta para um controle de recarga, visto que, se vários veículos Fiat 500e foram

recarregados ao mesmo tempo, a alta injeção de reativo pode causar significativo desbalanceamento das fases do sistema de energia.

Tabela 18: C1 - Consumo residência classe média

Cenário 1	Sem recarga do Fiat 500e	Com recarga do Fiat 500e em 70% SOC	Aumento
Consumo Mensal	300 kWh	416,55 kWh	38,85%
Custo Mensal	R\$ 243,00	R\$ 337,41	38,85%
Consumo Diário	10 kWh	13,88 kWh	38,85%
Consumo Médio das 19h às 22h04	2,308 kWh	6,193 kWh	168,32%
Demanda Máxima	0,847 kW	2,052 kW	142,24%

Fonte: Elaboração própria do autor

6.1.2. Consumo da residência de classe alta para o Cenário 1

A recarga do Fiat 500e iniciando às 19h também foi inserida na curva de carga da residência de classe alta, com a bateria com carga inicial em 70% SOC. O novo comportamento da curva de carga da residência é apresentado na Figura 74. Nas Figuras 75 e 76 são apresentados os comportamentos em cada fase L1 e L2, respectivamente.

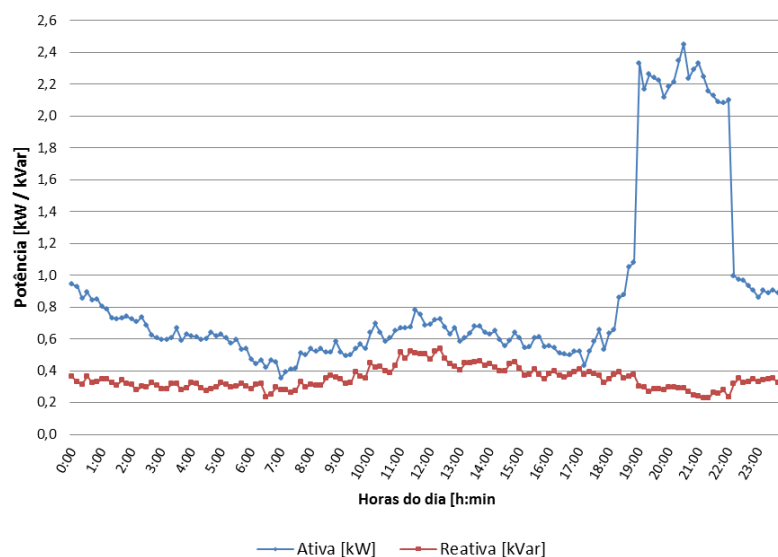


Figura 74: C1 - Curva da residência de classe alta, entre fases (L1-L2)

Fonte: Elaboração própria do autor

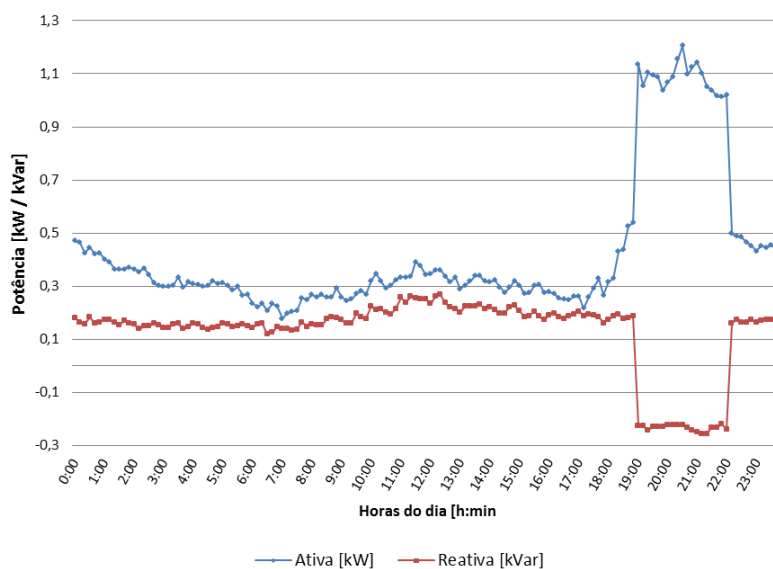


Figura 75: C1 - Curva da residência de classe alta, na fase L1
 Fonte: Elaboração própria do autor

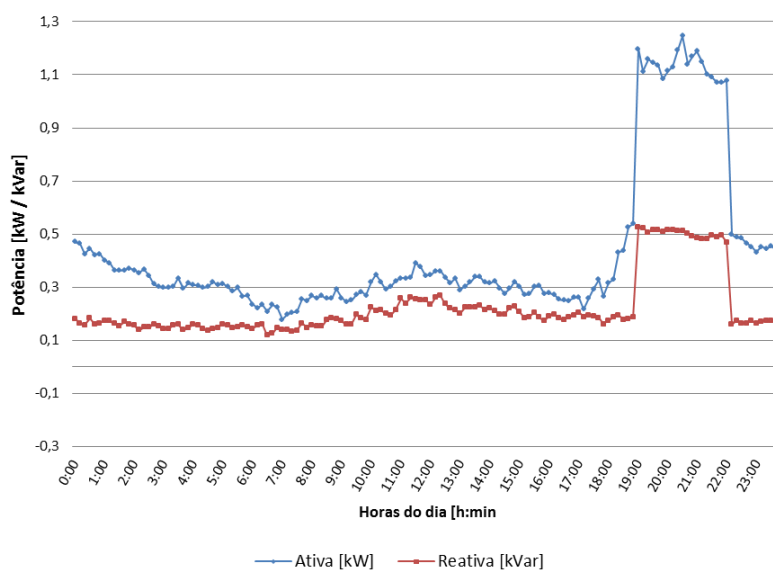


Figura 76: C1 - Curva da residência de classe alta, na fase L2
 Fonte: Elaboração própria do autor

A curva de carga da residência de classe alta também sofreu uma significativa mudança durante o período de recarga do Fiat 500e. Conforme Tabela 18, o consumo diário de energia que era de 16,67 kWh passou para 20,55 kWh e o consumo mensal passou de 500 kWh para 616,55 kWh, ocasionando um aumento de 23,31% no consumo total da residência.

Considerando a tarifa da Cemig (praticada em Janeiro/2017), a conta de energia da residência saltou de R\$ 405,00 para R\$ 499,41.

A mesma carga, o Fiat 500e, provocou menor impacto no consumo mensal da residência de classe alta quando comparado com o consumo da residência de classe média (aumento de 38,85%). Isto se dá porque o consumo da residência de classe alta é maior.

O impacto também foi menor no consumo médio no período de 19h às 22h04, que passou de 3,150 kWh para 7,035 kWh, quase duas vezes e meia a mais. Porém, a recarga do Fiat 500e no horário de ponta compromete a vida útil dos transformadores e sobrecarrega todo o SEP.

Tabela 19: C1 - Consumo residência classe alta

Cenário 1	Sem recarga do Fiat 500e	Com recarga do Fiat 500e com 70% SOC	Aumento
Consumo Mensal	500 kWh	616,55 kWh	23,31%
Custo Mensal	R\$ 405,00	R\$ 499,41	23,31%
Consumo Diário	16,67 kWh	20,55 kWh	23,31%
Consumo Médio das 19h às 22h04	3,150 kWh	7,035 kWh	123,35%
Demanda Máxima	1,231 kW	2,452 kW	99,26%

Fonte: Elaboração própria do autor

A potência reativa da curva de carga da residência de classe alta não apresentou variações significativas no período da recarga do Fiat 500e. Nas curvas individuais das fases L1 e L2 é possível verificar novamente o comportamento capacitivo e indutivo das fases, que pode impactar na alta injeção de potência reativa na rede e desbalanceamento entre as fases.

6.2. Consumo durante Cenário 2

No cenário 2 (C2), a recarga do Fiat 500e se inicia às 23 h, após o veículo percorrer o percurso total do dia, 41 km. Após percorrer esta distância, a bateria do veículo se encontra

em 70% SOC. Os dados de potência ativa e reativa, obtidos no capítulo anterior, serão inseridos nas curvas de carga das residências de classe média e alta. Uma nova análise é realizada visto que a recarga é iniciada em outro horário do dia.

6.2.1. Consumo da residência de classe média para o Cenário 2

Em C2, a proposta da recarga do Fiat 500e é iniciar às 23h, com a bateria com carga inicial em 70% SOC. A curva de carga da residência de classe média apresentará um novo comportamento, conforme apresentado na Figura 77. Nas Figuras 78 e 79 é apresentado o comportamento da curva de carga em cada fase L1 e L2, respectivamente.

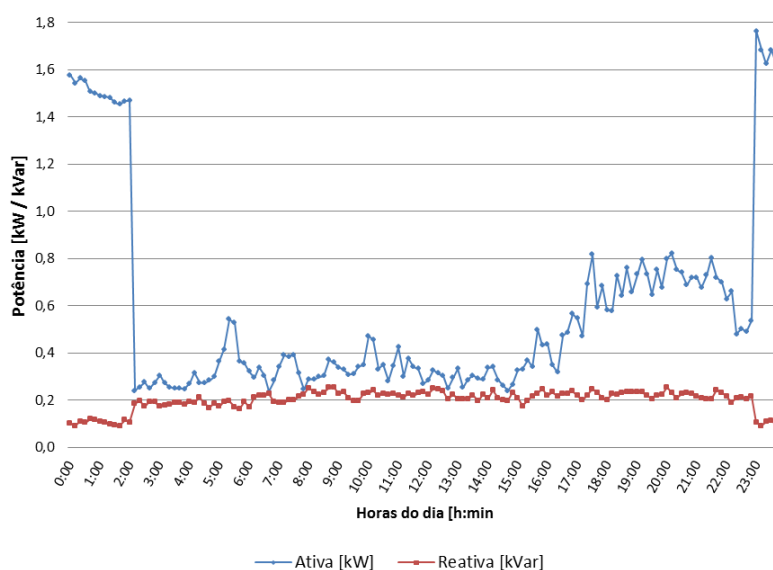


Figura 77: C2 - Curva da residência de classe média, entre fases (L1-L2)

Fonte: Elaboração própria do autor

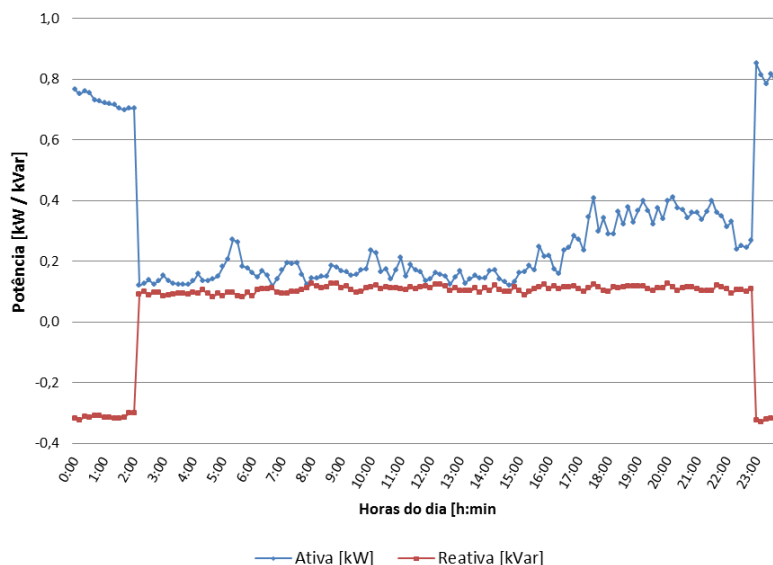


Figura 78: C2 - Curva da residência de classe média, na fase L1

Fonte: Elaboração própria do autor

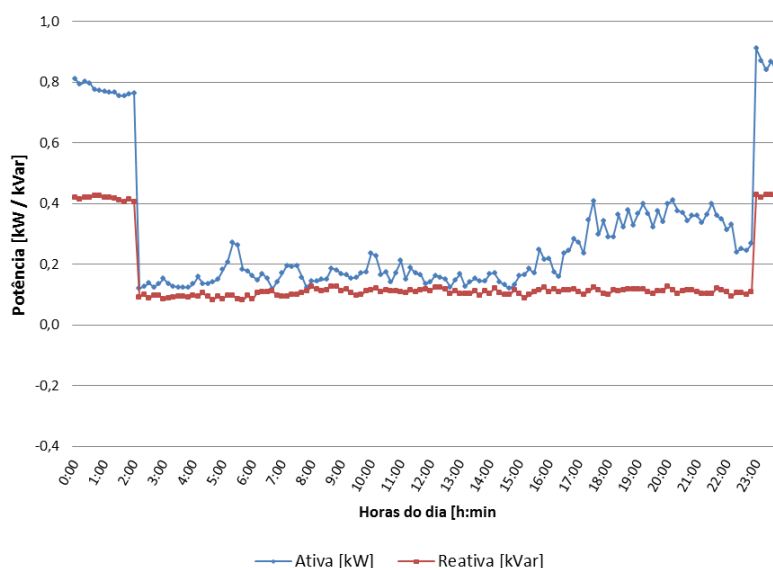


Figura 79: C2 - Curva da residência de classe média, na fase L2

Fonte: Elaboração própria do autor

Em C2, a curva de carga da residência de classe média apresentou um novo comportamento, apesar dos valores finais de consumo de energia diário e mensal serem os mesmos valores apresentados na análise em C1, já que o consumo da carga não mudou e forma de tarifação é a mesma para qualquer horário do dia. O que mudou foi o período da recarga, que foi deslocado para iniciar às 23h. Com isso, a recarga do Fiat 500e foi deslocada para fora do horário crítico de consumo. Conforme Tabela 19, o consumo de 4,933 kWh

durante a recarga do VE é praticamente resultante apenas da recarga do veículo que, por ocorrer fora do período de ponta, não sobrecarrega os transformadores do sistema de distribuição.

Tabela 20: C2 - Consumo residência classe média

Cenário 2	Sem recarga do Fiat 500e	Com recarga do Fiat 500e em 70% SOC	Aumento
Consumo Mensal	300 kWh	416,55 kWh	38,85%
Custo Mensal	R\$ 243,00	RS 337,41	38,85%
Consumo Diário	10 kWh	13,88 kWh	38,85%
Consumo Médio das 23h às 02h04	1,048 kWh	4,933 kWh	370,78%
Demanda Máxima	0,847 kW	1,764 kW	108,23%

Fonte: Elaboração própria do autor

O comportamento da potência reativa foi o mesmo apresentado em C1, sem variação significativa na curva entre fases e com alta injeção de potência reativa nas fases L1 e L2 individualmente. Porém, a alta injeção de potência reativa foi deslocada para fora do horário de alto consumo, diminuindo a preocupação com as sobrecargas do sistema e desbalanceamento entre as fases.

6.2.2. Consumo da residência de classe alta para o Cenário 2

C2 também foi aplicado à curva de carga de uma residência de classe alta. A recarga iniciou às 23h com a bateria com carga inicial em 70% SOC. O comportamento da curva de carga da residência de classe alta com a inserção da recarga do Fiat 500e é apresentado na Figura 80. O comportamento nas fases L1 e L2, separadamente, são apresentados nas Figuras 81 e 82, respectivamente.

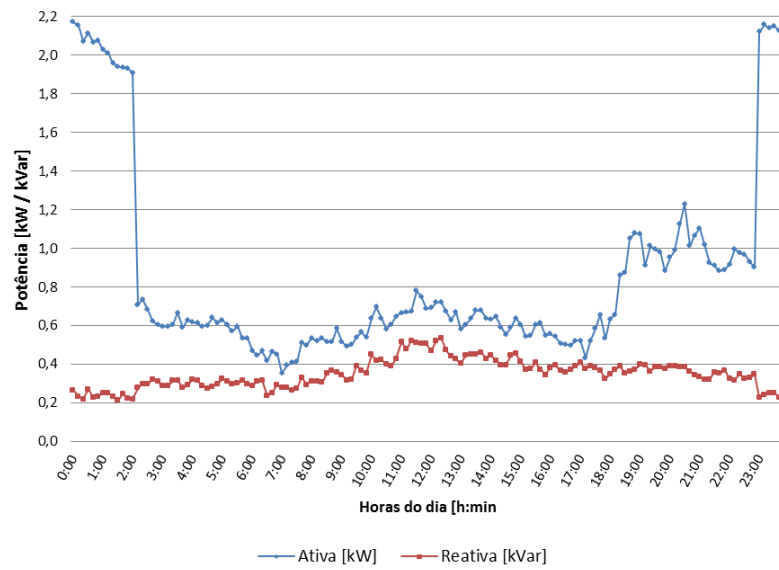


Figura 80: C2 - Curva da residência de classe alta, entre fases (L1-L2)
 Fonte: Elaboração própria do autor

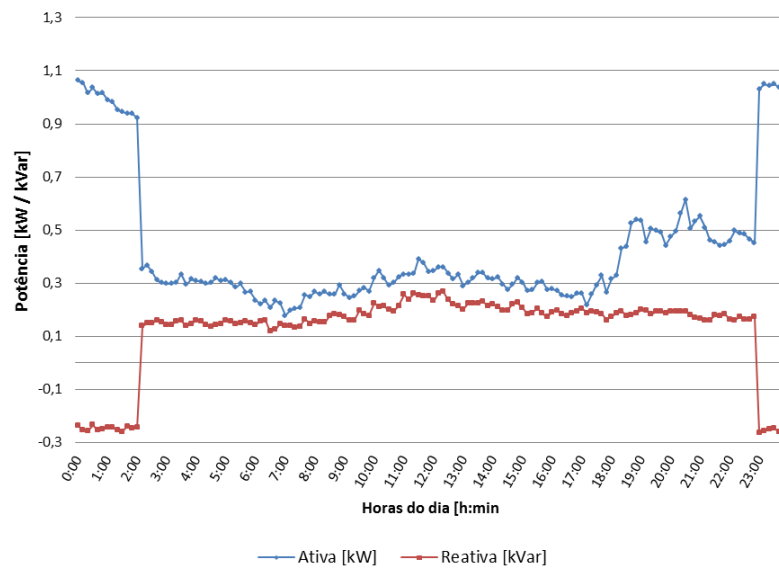


Figura 81: C2 - Curva da residência de classe alta, na fase L1
 Fonte: Elaboração própria do autor

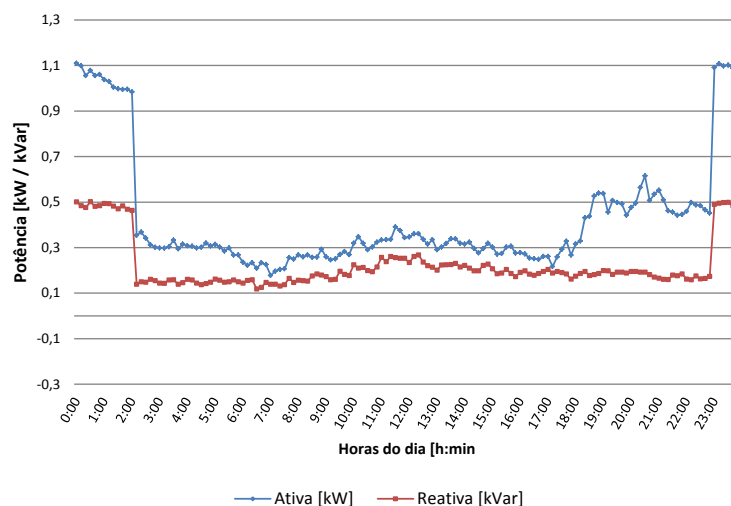


Figura 82: C2 - Curva da residência de classe alta, na fase L2

Fonte: Elaboração própria do autor

Assim como ocorreu com a curva da residência de classe média, aplicando C2 na curva da residência de classe alta foi observado o deslocamento do consumo do veículo Fiat 500e para fora do horário de ponta. Os valores finais de consumo de energia diário foram os mesmos valores apresentados em C1 já que o consumo da carga não mudou, apenas foi deslocada para outro período do dia, fora do horário crítico de consumo e a forma de tarifação é a mesma para qualquer horário do dia. O consumo médio de 4,933 kWh no período da recarga, de 23h às 2h04, pode-se considerar que é resultante apenas da recarga do veículo já que neste período o consumo da residência é baixo.

Tabela 21: C2 - Consumo residência classe alta

Cenário 2	Sem recarga do Fiat 500e	Com recarga do Fiat 500e em 70% SOC	Aumento
Consumo Mensal	500 kWh	616,55 kWh	23,31%
Custo Mensal	R\$ 405,00	R\$ 499,41	23,31%
Consumo Diário	16,67 kWh	20,55 kWh	23,31%
Consumo Médio das 23h às 02h04	2,643 kWh	6,528 kWh	147,00%
Demanda Máxima	1,231 kW	2,173 kW	78,58%

Fonte: Elaboração própria do autor

A mesma avaliação do comportamento da potência reativa realizada para a residência de classe média em C2 se aplica também para a residência de classe alta em C2, onde é observada alta injeção de potência reativa nas fases L1 e L2 individualmente e variação pouco significativa na curva entre fases. A alta injeção de potência reativa causa menor preocupação com as sobrecargas do sistema e desbalanceamento das fases devido ao deslocamento da recarga para fora do horário de ponta.

6.3. Consumo durante Cenário 3

Em C3, a recarga do Fiat 500e ocorre em dois momentos do dia, já que neste cenário foi considerado que o motorista do veículo possui postos de recarga próximos ao local de trabalho. A primeira recarga do dia se inicia às 8h em um posto de recarga e a segunda recarga do dia ocorre às 19h na residência do veículo. Ambas as recargas ocorrem com a bateria com carga inicial em 80% SOC. Os dados de potência ativa e reativa, obtidos no capítulo anterior, serão inseridos nas curvas de carga das residências de classe média, alta e de um estabelecimento comercial a fim de avaliar o impacto causado pelo veículo elétrico neste novo cenário de recarga.

6.3.1. Consumo do estabelecimento comercial para o Cenário 3

A primeira recarga do dia afetará o comportamento da curva de carga do estabelecimento comercial. A segunda recarga do dia será realizada na residência do veículo e afetará o comportamento da curva de carga da residência, que pode pertencer à classe média ou alta. O novo comportamento da curva de carga do estabelecimento comercial com a recarga do Fiat 500e iniciando às 8h pode ser observado na Figura 83. As Figuras 84 e 85 apresentam o comportamento em cada fase L1 e L2, entre fase-neutro, respectivamente.

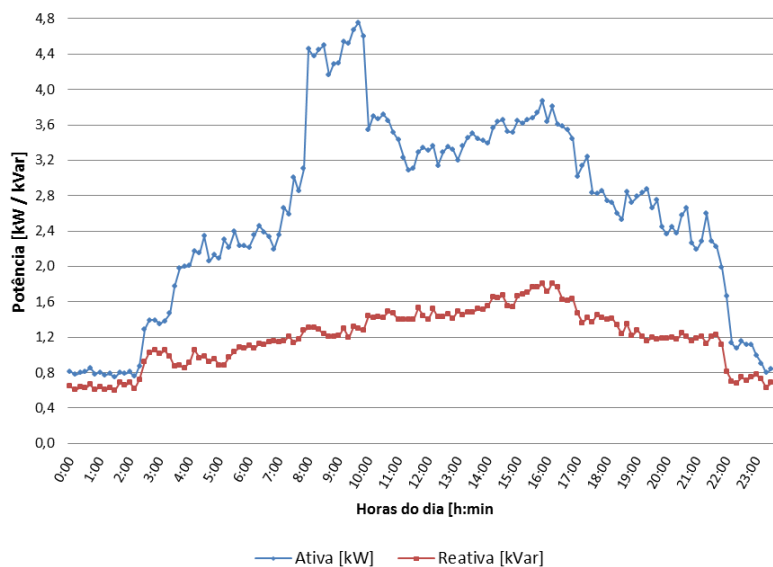


Figura 83: C3 - Curva do estabelecimento comercial, entre fases (L1-L2)
 Fonte: Elaboração própria do autor

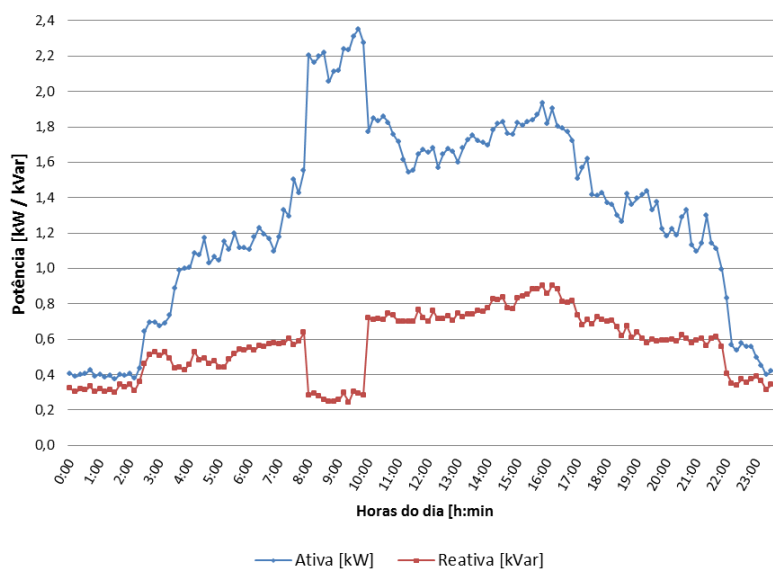


Figura 84: C3 - Curva do estabelecimento comercial, na fase L1
 Fonte: Elaboração própria do autor

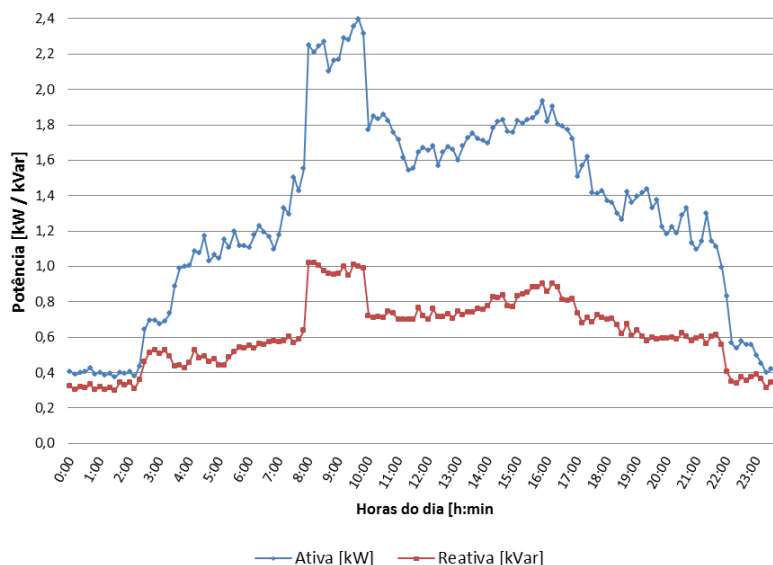


Figura 85: C3 - Curva do estabelecimento comercial, na fase L2

Fonte: Elaboração própria do autor

Considerando a recarga de apenas um VE, a curva de carga do estabelecimento comercial sofreu pequena variação durante o período da recarga. Isso se deve porque o consumo do estabelecimento comercial é alto e o impacto da recarga do Fiat 500e foi pouco significativo. Conforme Tabela 21, o consumo diário de energia que era de 60 kWh passou a ser de 62,39 kWh e o consumo mensal passou de 1800 kWh para 1871,70 kWh, ocasionando um aumento de apenas 3,98%. A conta do estabelecimento aumentou de R\$ 1.458,00 para R\$ 1.516,08.

Tabela 22: C3 – Consumo estabelecimento comercial

Cenário 3	Sem recarga do Fiat 500e	Com recarga do Fiat 500e em 80% SOC	Aumento
Consumo Mensal	1800 kWh	1871,70 kWh	3,98%
Custo Mensal	R\$ 1.458,00	R\$ 1.516,08	3,98%
Consumo Diário	60 kWh	62,39 kWh	3,98%
Consumo Médio das 08h às 09h52	6,546 kWh	8,935 kWh	36,51%
Demanda Máxima	3,874 kW	4,754 kW	22,72%

Fonte: Elaboração própria do autor

Na curva entre fases, a potência reativa não apresentou variações significativas no período da recarga do Fiat 500e. Novamente é possível observar o comportamento capacitivo e indutivo nas fases L1 e L2. A alta injeção de reativo é preocupante no estabelecimento comercial, pois está sujeito a fornecer energia para mais de um VE. Sendo assim, é necessário que o estabelecimento realize um gerenciamento da recarga para que não ocorra um alto consumo de energia ao mesmo tempo e alta injeção de reativo nas fases individuais que pode vir a provocar um grave desbalanceamento das fases do sistema de energia.

6.3.2. Consumo da residência de classe média para o Cenário 3

A segunda recarga do dia realizada pelo Fiat 500e se inicia às 19h na residência do veículo, com a bateria com carga inicial em 80% SOC. O comportamento da curva de carga da residência de classe média é apresentado na Figura 86 e nas Figuras 87 e 88 são apresentados os comportamentos individuais das curvas de carga nas fases L1 e L2, entre fase-neutro, respectivamente.

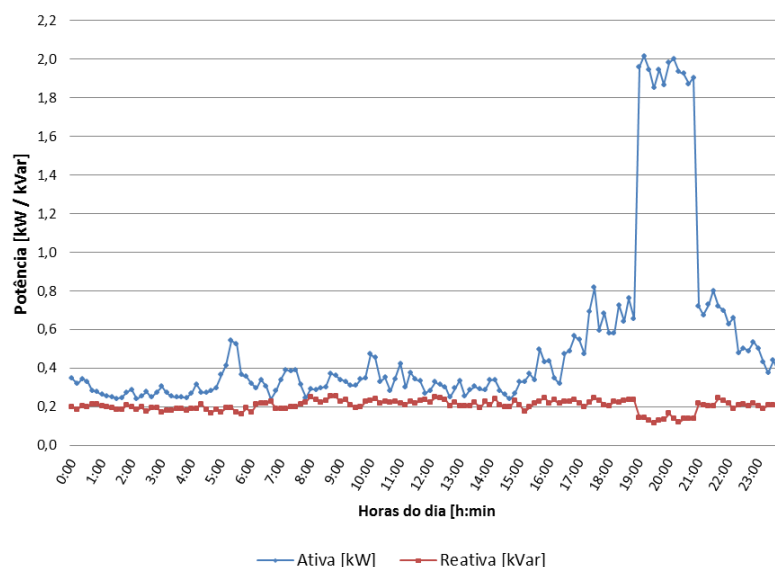


Figura 86: C3 - Curva da residência de classe média, entre fases (L1-L2)

Fonte: Elaboração própria do autor

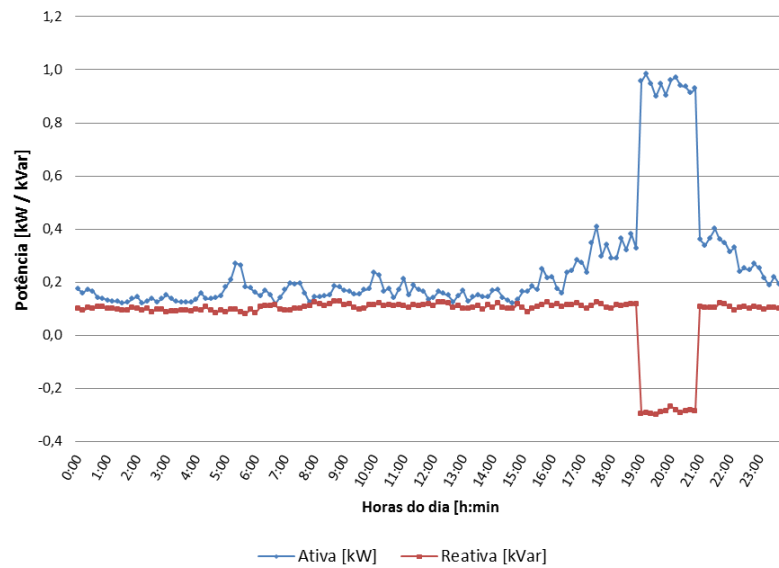


Figura 87: C3 - Curva da residência de classe média, na fase L1
 Fonte: Elaboração própria do autor

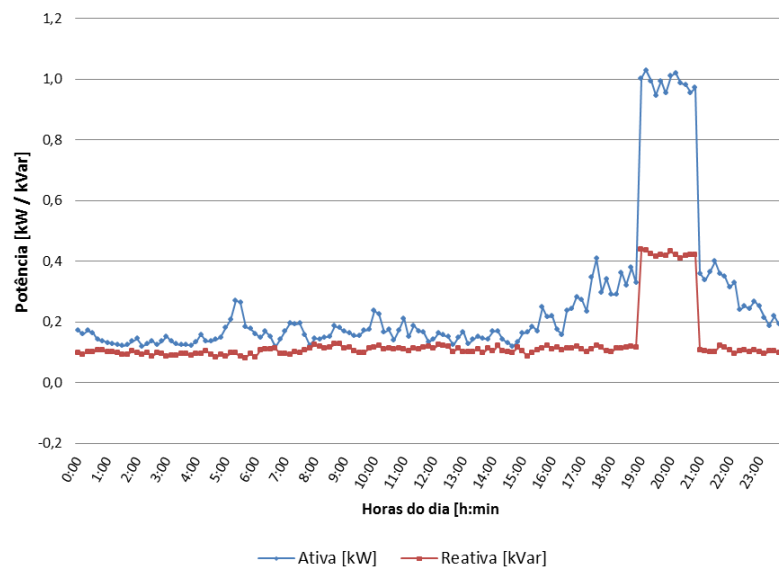


Figura 88: C3 - Curva da residência de classe média, na fase L2
 Fonte: Elaboração própria do autor

O que difere a recarga em C3 de C1 é que a recarga é iniciada com a bateria com carga inicial em 80% SOC e por isso, o tempo de recarga é menor. Sendo o tempo de recarga menor, menor será o consumo de energia conforme apresentado na Tabela 22.

Tabela 23: C3 - Consumo residência classe média

Cenário 3	Recarga do Fiat 500e em 70% SOC	Recarga do Fiat 500e em 80% SOC	Redução
Consumo Mensal	416,55 kWh	371,70 kWh	-10,77%
Custo Mensal	R\$ 337,41	R\$ 301,08	-10,77%
Consumo Diário	13,88 kWh	12,38 kWh	-10,77%
Consumo Médio das 19h às 22h04	6,193 kWh	4,698 kWh	-24,14%
Demanda Máxima	2,0522 kW	2,016 kW	-1,75%

Fonte: Elaboração própria do autor

Comparando com os dados obtidos em C1, houve uma redução de 10,77% no consumo da residência, visto que o veículo passou a ser recarregado mais vezes ao longo do dia. Várias recargas ao longo do dia evitam o alto consumo em uma única recarga.

O consumo diário de energia que era de 13,88 kWh, ao recarregar o Fiat 500e com bateria com carga inicial em 70% SOC, passou para 12,38 kWh e o consumo mensal passou de 416,55 kWh para 371,70 kWh. O consumo médio, das 19h às 22h, foi de 3,868 kWh, porém quando analisado no mesmo período de recarga do C1, o consumo médio era de 6,193 kWh. Houve uma pequena redução na demanda máxima, já que a recarga do veículo, mesmo por um tempo mais curto, foi somada à demanda da residência, que naquele momento já apresentava alto consumo de energia. Existe uma pequena diferença entre a potência solicitada para carregamento em condições de SOC distintas, além do tempo de carregamento do veículo que impacta em um consumo menor, quando avaliado o mesmo período de C1.

O comportamento da potência reativa na curva L1-L2, fase-fase, se repete com variações pouco significativas no período da recarga do Fiat 500e. Nas curvas L1 e L2, fase-neutro, o comportamento capacitivo e indutivo em cada fase.

É possível perceber que recargas ao longo do dia causam menos impacto nas curvas de carga do que uma única recarga, que requer grande quantidade de energia por um longo período de tempo. O impacto causado poderia ser ainda menor se a recarga fosse deslocada para fora do período de ponta.

6.3.3. Consumo da residência de classe alta para o Cenário 3

A segunda recarga do dia realizada pelo Fiat 500e, com a bateria com carga inicial em 80% SOC, também foi inserida na curva de carga da residência de classe alta. O comportamento da curva é apresentado na Figura 89 e o comportamento das fases L1 e L2, entre fase-neutro, são apresentados nas Figuras 90 e 91, respectivamente.

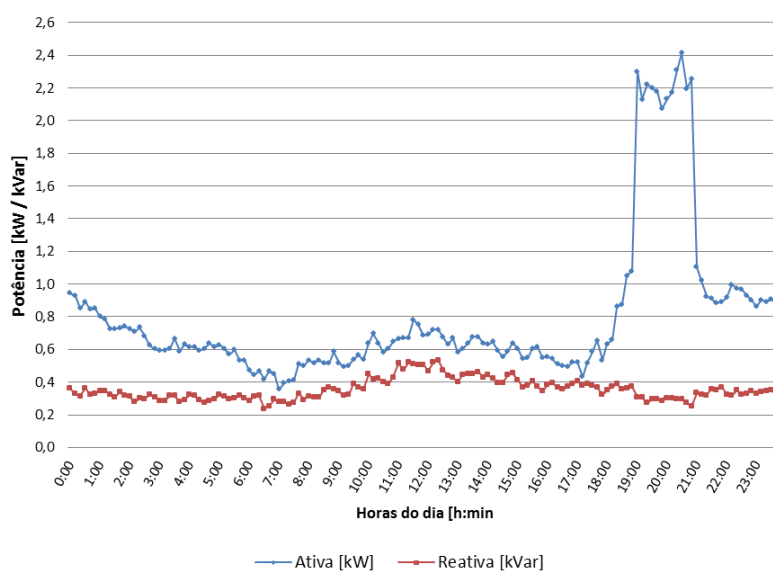


Figura 89: C3 - Curva da residência de classe alta, entre fases (L1-L2)

Fonte: Elaboração própria do autor

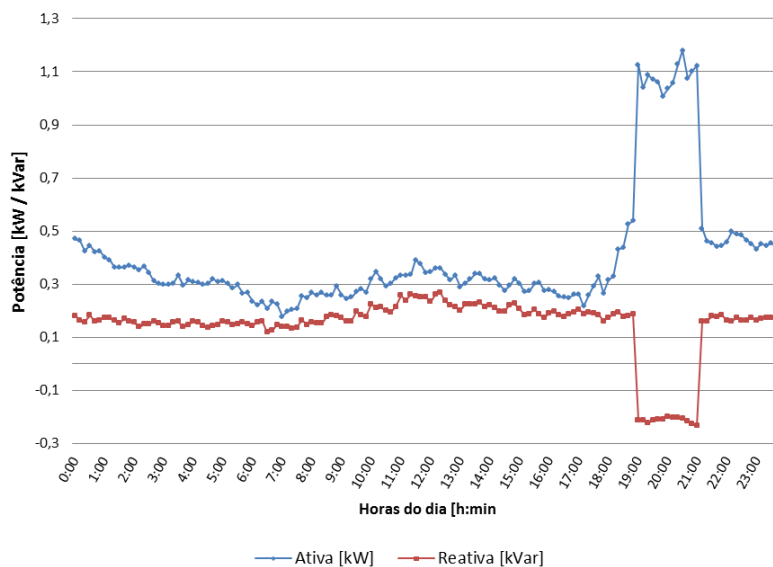


Figura 90: C3 - Curva da residência de classe alta, na fase L1

Fonte: Elaboração própria do autor

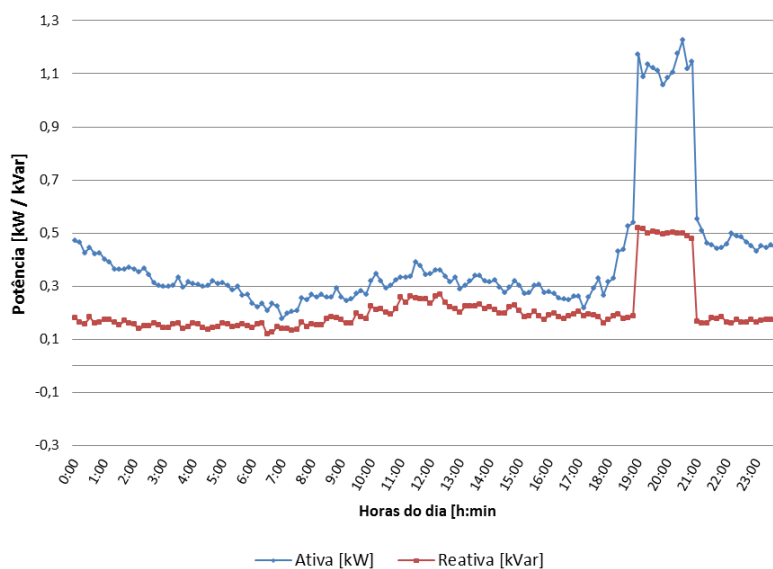


Figura 91: C3 - Curva da residência de classe alta, na fase L2

Fonte: Elaboração própria do autor

Assim como ocorreu com a curva da residência de classe média, aplicando C3 na curva da residência de classe alta foi observado um menor consumo devido ao menor tempo de recarga do veículo Fiat 500e. Houve uma pequena redução de 7,27% nos valores finais de consumo quando comparado aos valores obtidos em C1. O consumo diário de energia que era de 20,55kWh em C1, passou para 19,06 kWh e o consumo mensal passou de 616,55 kWh para

571,70 kWh. O consumo médio no período das 19h às 22h foi de 4,431 kWh, porém quando analisado no mesmo período de recarga do C1, o consumo médio era de 7,035 kWh. A redução na demanda máxima foi pouco significativa já que no momento da recarga do Fiat 500e a residência já apresentava alto consumo de energia.

Tabela 24: C3 - Consumo residência classe alta

Cenário 3	Recarga do Fiat 500e em 70% SOC	Recarga do Fiat 500e em 80% SOC	Redução
Consumo Mensal	616,55 kWh	571,70 kWh	-7,27%
Custo Mensal	R\$ 499,41	R\$ 463,08	-7,27%
Consumo Diário	20,55 kWh	19,06 kWh	-7,27%
Consumo Médio das 19h às 22h04	7,035 kWh	4,431 kWh	-21,26%
Demanda Máxima	2,452 kW	2,414 kW	-1,56%

Fonte: Elaboração própria do autor

A mesma avaliação do comportamento da potência reativa realizada para a residência de classe média em C3 também se aplica para a residência de classe alta. Foi observada pouca variação de reativo na curva L1-L2, fase-fase, e alta injeção de potência reativa nas curvas L1 e L1, fase-neutro, que pode provocar sobrecargas do sistema e desbalanceamento das fases.

É importante salientar que recargas ao longo do dia causam menos impacto nas curvas de carga do que uma única recarga, que requer grande quantidade de energia por um longo período de tempo. O impacto causado poderia ser ainda menor se um mecanismo de gerenciamento de recarga fosse aplicado para realizar a programação da recarga para fora do período de ponta e fosse praticada a tarifação diferenciada, para estimular o consumo de energia em determinados horários do dia.

6.4. Tarifa Branca

Através da publicação da Resolução nº 733/2016, a partir de 1º de janeiro de 2018 será possível aos consumidores do grupo B, com consumo mensal superior a 500 kWh, a adesão à tarifação horária denominada tarifa branca (ANEEL, 2016b).

A tarifa branca é a nova opção de tarifa de consumo de energia, onde o valor da energia varia de acordo com o dia e o horário de consumo. Atualmente é praticada a tarifa convencional onde é cobrado um único valor, em R\$/kWh, pela energia consumida em todos os dias e em todos os horários ao longo dia.

Conforme exemplificado na Figura 92, o sistema da tarifa branca prevê três faixas de cobrança da energia denominadas ponta, intermediária e fora de ponta. Nos horários de ponta e intermediário, o valor da tarifa é mais caro. Nos horários fora de ponta, o valor da tarifa é mais barato. A tarifação horária se aplica apenas aos dias úteis. Nos fins de semana e feriados é aplicada a tarifa fora de ponta. O objetivo da tarifa branca é incentivar o consumo no período fora de ponta e diminuir o consumo no horário de ponta, onde a tarifação possui valores mais elevados (ANEEL, 2017).

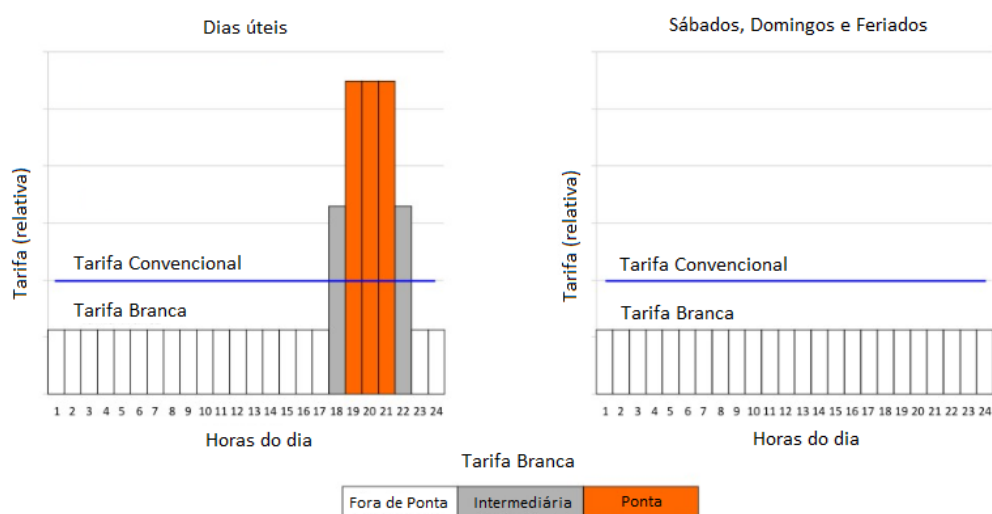


Figura 92: Comparativo entre Tarifa Branca e Tarifa Convencional

Fonte: ANEEL, 2017

De acordo com a Resolução nº 733/2016, a partir de janeiro de 2019 a tarifa branca estará disponível para os consumidores com consumo médio entre 250 kWh e 500 kWh. A partir de janeiro de 2020 todos os consumidores poderão solicitar a adesão à tarifa branca, exceto aos consumidores classificados como baixa renda. Ainda de acordo com a Resolução, a distribuidora é a responsável pelos custos de aquisição e instalação dos equipamentos de medição necessários ao faturamento da tarifa branca (ANEEL, 2017).

Os períodos considerados ponta, intermediário e fora de ponta são homologados pela ANEEL nas revisões tarifárias periódicas de cada distribuidora. De acordo com o Simulador de Consumo da Cemig (2017b), o período de ponta compreende das 17h às 20h, o período intermediário corresponde das 16h às 17h e depois das 20h até às 21h. Os demais horários e ao longo dos fins de semana e feriados estão no período fora de ponta. Os preços aplicados em cada faixa são apresentados na Tabela 24.

Uma nova análise será realizada no faturamento da residência de classe alta, de consumo mensal de 500 kWh/mês. Serão considerados os cenários de recarga C1 e C2, considerando que o faturamento da residência ocorre por meio da tarifa branca. Será considerada a tarifa da Cemig (praticada em Janeiro/2017), onde o preço do kWh é de R\$ 0,81 para consumidores residenciais do grupo B1 e B3 (Cemig, 2017a).

Tabela 25: Tarifa Branca

Período	Horários	Tarifas
Ponta	17h às 20h	2 x tarifa convencional
Intermediário	16h às 17h 20h às 21h	1,25 x tarifa convencional
Fora de Ponta	Demais horários Fins de semana Feriados	0,8 x tarifa convencional

Fonte: Cemig, 2017b

6.4.1. Tarifa Branca na residência de classe alta para o Cenário 1

Em C1, o horário da recarga do Fiat 500e ocorre das 19h às 22h04. O consumo diário da residência, que era de 16,67 kWh passou para 20,55 kWh e o consumo mensal passou de 500 kWh para 616,55 kWh. A recarga do Fiat 500e provocou um aumento de 23,31% no consumo total da residência. Considerando a tarifa da Cemig, na tarifação convencional a conta de energia da residência apresentou o mesmo aumento de 23,31%, saltando de R\$ 405,00 para R\$ 499,41.

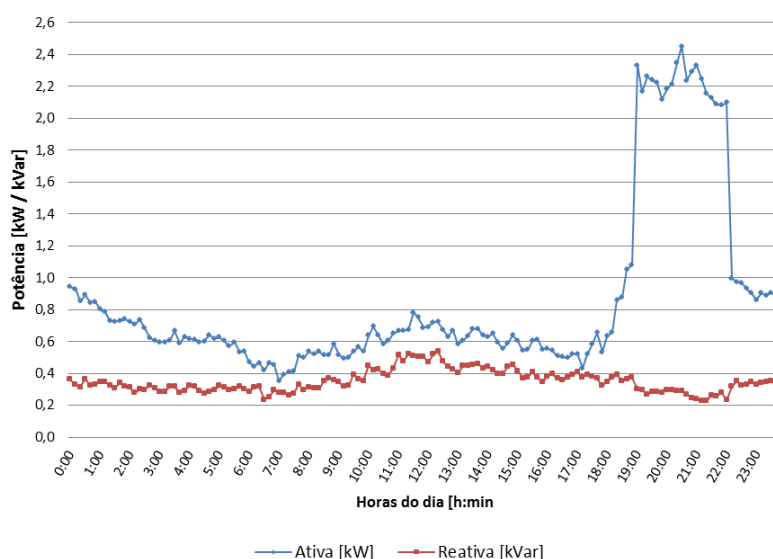


Figura 93: C1 - Curva da residência de classe alta, entre fases (L1-L2)

Fonte: Elaboração própria do autor

Na tarifa branca, comparando com a tarifa convencional, o valor da energia se torna mais barato no período fora de ponta e se torna mais caro nos períodos intermediário e ponta.

Conforme observado na Tabela 25, aplicando C1 na residência de classe alta faturada pela tarifa branca, ocasionou em um aumento de 23,31% no consumo total da residência, porém houve um aumento de 35,03% na conta de energia da residência em relação à tarifa sem recarga do veículo e um aumento de 9,5% em relação à cobrança da tarifa convencional, visto que grande parte da recarga do Fiat 500e ocorreu no período de ponta.

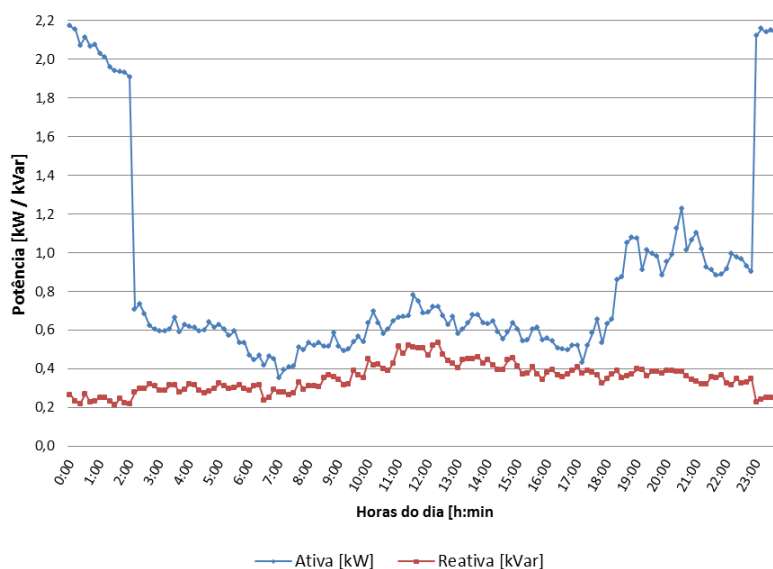
Tabela 26: C1 - Tarifa Branca na residência classe alta

Cenário 1	Sem recarga do Fiat 500e	Recarga do Fiat 500e	
		Tarifa Convencional	Tarifa Branca
Consumo Mensal	500 kWh	616,55 kWh	616,55 kWh
Custo Mensal	R\$ 405,00	R\$ 499,41	R\$ 546,86
Aumento	0%	23,31%	35,03%

Fonte: Elaboração própria do autor

6.4.2. Tarifa Branca na residência de classe alta para o Cenário 2

Em C2, o horário da recarga do Fiat 500e ocorre das 23h às 02h04. Apesar da curva de carga apresentar um novo comportamento, o consumo diário e mensal da residência é o mesmo encontrado em C1 visto que o consumo aumentou os mesmos 23,31%. Na tarifação convencional, que independe do horário do consumo, a conta de energia apresentou o mesmo aumento de 23, 31%, saltando de R\$ 405,00 para R\$ 499,41.

**Figura 94: C2 - Curva da residência de classe alta, entre fases (L1-L2)**

Fonte: Elaboração própria do autor

Aplicando C2 na residência de classe alta faturada pela tarifa branca, ocasionou em um aumento de 23,31% no consumo total da residência, porém toda a recarga do Fiat 500e ocorreu no período fora de ponta. Com isso, aplicando a tarifa branca o aumento da fatura foi de 21,26%, isto é, o acréscimo do valor cobrado foi inferior ao acréscimo de energia consumida, conforme observado na Tabela 26. Em relação ao valor cobrado pela tarifa convencional foi observada uma redução de 1,66%, comprovando que o consumo fora do período de ponta gera economia para o consumidor.

Tabela 27: C2 – Tarifa Branca na residência classe alta

Cenário 2	Sem recarga do Fiat 500e	Recarga do Fiat 500e	
		Tarifa Convencional	Tarifa Branca
Consumo Mensal	500 kWh	616,55 kWh	616,55 kWh
Custo Mensal	R\$ 405,00	R\$ 499,41	R\$ 491,12
Aumento	0%	23,31%	21,26%

Fonte: Elaboração própria do autor

6.5. Análise dos resultados

Do ponto de vista dos consumidores, o impacto do carregamento do veículo elétrico em diferentes horários do dia é o mesmo, já que as tarifas não fazem distinção de horário de ponta. Entretanto, para o Sistema Elétrico, a carga do veículo nos cenários C1 e C3 são os piores, pois existe a coincidência de demandas elevadas. O cenário C2, entretanto, é o mais adequado para o carregamento do veículo, pois utiliza energia em horário de baixa carga.

Ao aderir à tarifa branca foi observado que ao consumir no período de ponta, o custo da energia aumenta muito em relação à tarifa convencional. Ao consumir no período fora de ponta há uma economia para o consumidor, porém esta economia não é tão expressiva.

A adesão à tarifa branca deverá ser incentivada pelas concessionárias, estimulando o consumidor a carregar o veículo após às 21h. Para tal, dispositivos de acoplamento dos veículos à rede deverão contar com sistemas de controle para habilitar a carga após o horário

programado, facilitando ao usuário não ter que retornar ao estacionamento para conectar o veículo apenas após o horário determinado e sim, já deixá-lo na condição de *standby*, aguardando a carga ser habilitada.

A injeção desequilibrada de energia reativa nas fases preocupa, pois causará desequilíbrio de tensões em qualquer um dos três cenários. No caso de alta penetração deste tipo de carga, a concessionária deverá reavaliar os desequilíbrios de tensão com maior rigor nos horários utilizados para a carga do veículo.

7. CONCLUSÕES

As recentes discussões sobre as questões ambientais têm estimulado a retomada do veículo elétrico como mais uma alternativa de transporte. Seja como estratégia de diversificação da matriz energética e até mesmo por questões estratégicas, frente ao alerta iminente do fim das reservas petrolíferas em um curto espaço de tempo.

Foi analisada a trajetória histórica do veículo elétrico, que se inicia junto com o surgimento do automóvel, no início do século XVIII. Nesta época muitos investimentos foram realizados no desenvolvimento do veículo elétrico comprovados com alguns exemplos, como o veículo Riker que venceu, em 1894, a primeira corrida automotiva em circuito oficial, competindo com os veículos a combustão da época. Outro exemplo é o elétrico “La Jamais Contente”, que se tornou o primeiro veículo a ultrapassar a velocidade de 100 km/h.

Entre o veículo elétrico e o veículo a combustão houve uma acirrada competição. Devido às descobertas de grandes jazidas de petróleo nos EUA, os veículos com motor a combustão se tornaram a tecnologia dominante. Porém, no cenário mundial, o veículo elétrico retornava sempre que surgiam grandes crises energéticas do petróleo. Isto ocorreu durante a Segunda Guerra Mundial, onde, devido à falta de gasolina, alguns projetos de veículos elétricos surgiram em maior número na França. A retomada mais expressiva da produção de automóveis elétricos ocorreu após a crise do petróleo em 1973, onde diversos países se preocuparam em diminuir a dependência do petróleo.

Diante das crises energéticas do petróleo, o Brasil buscou por outras alternativas energéticas, desconsiderando o uso do veículo elétrico. Durante a Segunda Guerra Mundial foi feito uso do gasogênio nos veículos. Durante a crise do petróleo em 1973 foi feito uso do álcool como substituto da gasolina. Em 1996 foi implementado o uso do gás natural nos automóveis e desde 2003 foi adotado no país a motorização bicomcombustível (flex).

Durante o período da crise do petróleo, foi desenvolvido o veículo Gurgel Itaipu, em 1974, considerado o primeiro veículo elétrico desenvolvido no país. Era um minicarro destinado ao uso urbano, recarregado em 120 V. Devido ao seu baixo desempenho e a baixa autonomia das baterias, o projeto não obteve sucesso para seguir adiante. No Brasil ainda há

pouco incentivo em relação ao uso de automóveis elétricos. Não há produção nacional de veículo elétrico e por isso, os que estão no país são todos importados. Atualmente o único veículo elétrico comercializado no Brasil é o veículo BMW i3, que é vendido a um valor que o torna inacessível para a maioria da população.

A tecnologia dos veículos elétricos tem obtido grandes avanços. A bateria Li-íon é a grande aposta por possuir maior densidade de energia e menor peso dentre as demais. A combinação da bateria com os ultracapacitores tem contribuído na melhoria do rendimento do veículo e na proteção da vida útil da bateria. A frenagem regenerativa, presente na maioria dos veículos elétricos nas quatro rodas, permite recuperar parte da energia da frenagem, contribuindo no aumento da autonomia do veículo, especialmente nos percursos urbanos.

Apesar dos avanços, a confiança no veículo elétrico ainda é baixa. Isto é perceptível ao constatar, em uma pesquisa no estado americano da Califórnia, que apenas 3,8% dos domicílios possuem o veículo elétrico como único veículo de transporte da residência, e ao sucesso de vendas dos híbridos Toyota Prius e Honda Insight, que representam o passo intermediário da evolução dos automóveis elétricos.

A baixa autonomia ainda é o grande desafio a ser superado pelo veículo elétrico, pois impacta diretamente na recarga, que por sua vez depende diretamente do sistema elétrico de energia. O rápido crescimento do mercado de veículos elétricos impacta diretamente no aumento do consumo de energia elétrica. A demanda extra de energia causada pelos veículos elétricos pode causar sobrecarga no circuito de distribuição e afetar a qualidade de energia.

Os dados analisados neste trabalho são referentes ao veículo elétrico Fiat 500e, que atualmente é vendido apenas nos estados americanos da Califórnia e Oregon, a fim de atender ao programa ZEV. O programa ZEV determina que as montadoras que fornecem veículos para esses estados também forneçam veículos elétricos a seus consumidores.

Em relação ao desempenho energético, os veículos elétricos superam com vantagem os veículos a combustão. Com base nos dados divulgados da autonomia do Fiat 500e, enquanto um veículo a combustão possui desempenho energético médio de 12,5 km/L, o Fiat 500e possui desempenho de 5,78 km/kWh, equivalente de 51,44 km/l. O custo do km utilizando gasolina seria de R\$ 0,30 e utilizando álcool seria de R\$ 0,23. Considerando a tarifa da

Cemig, praticada em Janeiro/2017 acrescida de impostos, onde o preço do kWh é de R\$ 0,81, o custo do km seria R\$ 0,14 utilizando energia elétrica, uma redução de 53,33% em relação ao valor da gasolina e 39,13% em relação ao álcool.

Em relação ao custo com combustível, para percorrer a autonomia total de 135 km do Fiat 500e, seriam gastos R\$ 12,38 quando abastecido no Brasil. Em um veículo a combustão, abastecido a gasolina, seriam gastos R\$ 40,50 para percorrer a mesma distância no país.

O veículo elétrico é uma carga eletroeletrônica e sua recarga sem controle pode ocasionar perdas no sistema de distribuição, desvio de tensão, gerar distorções harmônicas e injeção de potência reativa na rede. O presente trabalho apresenta duas análises sobre o impacto do veículo elétrico no sistema elétrico de energia. A primeira análise é realizada sobre o comportamento dos parâmetros elétricos durante a recarga do Fiat 500e, especialmente relacionado à injeção de harmônicos e potência reativa na rede elétrica. A segunda análise foi realizada inserindo os dados de potência ativa e reativa, obtidos nas medições realizadas, nas curvas de carga de consumidores em diferentes cenários, como forma de reproduzir o efeito causando por um veículo elétrico ao ser recarregado em um determinado consumidor. Os resultados encontrados contribuem para entender como a recarga do veículo elétrico em diferentes horários do dia pode afetar a curva de carga de consumidores e consequentemente irá afetar de diferentes formas o sistema elétrico de potência.

Na primeira análise, o Fiat 500e foi recarregado em duas condições, com a bateria com carga inicial em 70% e 80% SOC. A recarga foi realizada em 220 V (AC) e 60 Hz. Os dados obtidos foram analisados com base nas normas IEC 61000-3-2:2014 e PRODIST Módulo 8. Em ambas as recargas, o consumo médio de potência ativa foi de 1,22 kWh. O maior valor encontrado de DHTv foi de 1%, atendendo à norma PRODIST que limita o valor em 10%. O maior valor encontrado de DHTi foi de 6,5%, que corresponde a 0,37 A. Esse valor atende à norma IEC 61000, que limita o valor em 2,3 A.

Ao analisar os dados de potência, há um alto valor de potência reativa negativa na fase L1, característica típica dos carregadores de bateria devido ao comportamento capacitivo. Na fase L2 foi observado valor de potência reativa positiva, apresentando compensação de reativo típico de dispositivos eletrônicos. Devido a isto, o fator de potência encontrado foi de 0,99 entre fases (L1-L2), atendendo à norma PRODIST que limita em $1 \leq FP \leq 0,92$ (indutivo ou

capacitivo). O consumo médio de potência ativa foi por volta de 1,20 kW em ambas as recargas.

Na segunda análise, os dados de potência ativa e reativa obtidos durante a recarga do Fiat 500e, com carga inicial em 70% e 80% SOC, foram inseridos nas curvas de carga de consumidores residenciais de classe média, alta e de um estabelecimento comercial típico, em 3 cenários de recarga distintos.

O cenário 1, onde o Fiat 500e está com a bateria em 70% SOC e inicia sua recarga às 19h, foi aplicado nas curvas de carga das residências de classe média e alta. É um típico modo de recarga sem controle, onde representa a tendência dos veículos elétricos serem recarregados em casa, no instante que é conectado à rede elétrica, no período de maior consumo de energia elétrica. Foi observado que a introdução da recarga do veículo elétrico causou um grande impacto no comportamento das curvas de carga das residências. Além do aumento do consumo de energia, que impactou diretamente na conta de energia do consumidor, o consumo médio no período de 19h às 22h, aumentou em 168,32% para a residência de classe média e em 123,35% para a residência de classe alta.

O mais preocupante é o valor atingido pela demanda máxima das residências durante a recarga do Fiat 500e. A demanda máxima apresentou um aumento de 142,24% na residência de classe média e 99,26% na residência de classe alta, em um período do dia onde o sistema já está operando em sua capacidade máxima, com temporárias sobrecargas que ocorrem no período de ponta.

No cenário 2, o Fiat 500e é recarregado às 23h, com a bateria em 70% SOC. O mesmos dados de potência foram inseridos nas curvas de carga das residências de classe média e alta, porém, em um novo período do dia. Este cenário pode ser considerado um típico modo de recarga com controle, onde a recarga foi programada para fora do período de ponta. Porém, o valor da tarifa de energia não mudou visto que a forma de tarifação é a mesma para qualquer horário do dia. Pode-se considerar que o consumo de energia das residências durante a madrugada foi resultante apenas do consumo do Fiat 500e, não sobrecarregando os transformadores do sistema de distribuição que neste período operam quase a vazio.

Através da tarifação diferenciada, onde o preço da energia elétrica varia segundo as horas do dia, os proprietários dos veículos elétricos seriam estimulados a efetuarem a recarga do automóvel fora do horário de ponta, consumindo energia nos horários de tarifas mais baixas e restringir o consumo nos horários de tarifas mais altas. No Brasil, ao estimular a recarga no período de carga leve do sistema, seria utilizada a parcela de energia gerada pelas hidrelétricas, visto que, se for necessário utilizar a parcela de energia gerada pelas termelétricas o nível de emissão de CO₂ será semelhante a um veículo a combustão.

No cenário 3, a recarga do veículo é realizada em dois períodos do dia, às 8h e às 19h, com a bateria em 80% SOC. A primeira recarga do dia ocorre em um estabelecimento comercial. A curva de carga do estabelecimento sofreu pequena variação visto que o impacto de apenas um veículo elétrico é pouco significativo. Este tipo de estabelecimento está sujeito a fornecer energia para uma quantidade maior de veículos elétricos. Porém, para a realização de recarga é necessário que o estabelecimento possua capacidade de monitoramento e gerenciamento da eletricidade em tempo real e uma forma de tarifação ao proprietário do veículo elétrico, que depende de uma regulação da cobrança da recarga. É necessário também que o estabelecimento realize um gerenciamento da recarga para que não ocorra alto consumo de energia de vários veículos ao mesmo tempo e alta injeção de reativo nas fases individuais, que pode vir a provocar um grave desbalanceamento das fases do sistema de energia.

Como no cenário 3 o Fiat 500e é recarregado em dois momentos do dia, a segunda recarga do dia ocorreu na residência, de classe média ou alta. O tempo de recarga foi menor resultando em um consumo de energia menor, impactando diretamente na tarifa de energia da residência. Recargas ao longo do dia evitam o alto consumo de energia em uma única carga e também reduzem o tempo de recarga.

Ao aplicar a tarifa branca foi observado que, ao priorizar o consumo fora do horário de ponta, o acréscimo do valor da fatura foi inferior ao acréscimo da energia consumida. Ao comparar com a tarifação convencional foi possível comprovar que a implementação da tarifa branca pode vir a gerar economia ao consumidor.

A autonomia ainda é a grande limitação dos veículos elétricos. Devido a isso, para promover a mobilidade elétrica se faz necessária uma quantidade satisfatória de postos de recarga que permitiriam um maior número de recargas ao longo do dia e com isso, menor seria

o tempo de abastecimento. Porém, o período do dia em que é realizada a recarga impacta definitivamente na demanda de energia do sistema elétrico.

Mais postos de recarga requerem uma regulamentação do fornecimento e regulação da cobrança a ser praticada neste tipo de serviço. A instalação de uma infraestrutura de medição avançada, conhecida como *Smart Grids*, medidores inteligentes seriam capazes de detectar sobrecargas no sistema, realizar o gerenciamento da recarga, que poderia ser programada para fora do período de alto consumo. Seria possível também gerenciar a tarifação diferenciada, que impactaria diretamente sobre o comportamento do consumo de energia por parte do consumidor.

8. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O presente trabalho analisou o impacto da recarga de apenas um veículo elétrico em um estabelecimento comercial. Porém, este tipo de estabelecimento possivelmente realizará a recarga em mais de um veículo elétrico. Como sugestão para trabalhos futuros pode-se realizar um estudo mais profundo sobre o impacto da recarga de vários veículos elétricos em um estabelecimento comercial, em diferentes horários ao longo do dia e o gerenciamento da eletricidade em tempo real a ser instalado neste tipo de recarga.

A implementação da tarifa branca irá impactar diretamente no comportamento do consumidor, que resultará em uma nova curva de carga residencial. Sugere-se um estudo sobre o impacto no sistema elétrico e na tarifação de consumidores residenciais bem como a regulação da cobrança a ser praticada neste tipo de serviço.

A bateria de sódio-metal-cloreto (Ni-NaCl_2), comercialmente conhecida como bateria ZEBRA, também tem sido aplicada em veículos elétricos e foi apenas citada neste trabalho. É sugerido que seja realizada uma comparação entre a bateria ZEBRA e a bateria de Li-íon, abordando vantagens e desvantagens, capacidade de armazenamento, densidade energética e impactos econômicos e ambientais.

Devido à demora no tempo de recarga, há a proposta de instalar postos de troca rápida de bateria. Sugere-se uma pesquisa sobre os impactos sociais e ambientais, reaproveitamento e reciclagem das baterias, distância de instalação dos postos e levantamento dos obstáculos enfrentados na instalação destes postos de troca.

Visto que no Brasil ainda há pouco incentivo aos veículos elétricos, pode-se também aprofundar o estudo em relação às políticas praticadas até hoje no Brasil e fazer uma projeção das medidas que devem ser adotadas, com base nas políticas implantadas no Japão e EUA.

REFERÊNCIAS

- ABVE – Associação Brasileira do Veículo Elétrico. **O que é veículo elétrico?** Disponível em: <<http://www.abve.org.br/perguntas>>. Acesso em: 11 abr. 2016.
- ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. **Aprenda a calcular o consumo de seu aparelho e economize energia.** 17/05/2011. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/noticias/Output_Noticias.cfm?Identidade=4101&id_area=90>. Acesso em: 16 nov. 2016.
- ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. **PRODIST Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica.** rev. 7. 76p. 2016a.
- ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. **Resolução Normativa N° 733, de 06 de Setembro de 2016: Estabelece as condições para a aplicação da modalidade tarifária horária branca.** Brasília: Diário Oficial da União. Seção 1. p.96. 12/09/2016b.
- ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. **ANEEL aprova tarifa branca, nova opção para os consumidores a partir de 2018.** 13/09/2016. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/sala-de-imprensa-exibicao/-/asset_publisher/XGPXSqdMFHrE/content/aneel-aprova-tarifa-branca-nova-opcao-para-os-consumidores-a-partir-de-2018/656877?inheritRedirect=false>. Acesso em: 02 fev. 2017.
- ANP – Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. **SLP – Sistema de Levantamento de Preços de 08/01/2017 a 14/01/2017.** Disponível em: <http://www.anp.gov.br/preco/prc/Resumo_Por_Estado_Index.asp>. Acesso em: 21 jan. 2017.
- AUTOENTUSIASTAS. **Uma breve história da partida do motor.** Disponível em: <<http://www.autoentusiastas.com.br/2014/07/gentleman-start-your-engines-uma-breve-historia-da-partida/>>. Acesso em: 19 abr. 2016.
- BARAN, Renato. **A introdução de veículos elétricos no Brasil: Avaliação do impacto no consumo de gasolina e eletricidade.** 139p. Tese (Doutorado em Planejamento Energético). Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2012.
- BARASSA, Edgar. **Trajetória Tecnológica do Veículo Elétrico: Atores, Políticas e Esforços Tecnológicos no Brasil.** 132p. Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético). Campinas: Universidade Estadual de Campinas, 2015.
- BERGER, Lars T.; INIEWSKI, Krzysztof. **Smart Grid – Applications, Communicatios and Security.** 1.ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2012.
- BORBA, Bruno Soares M. C. **Modelagem Integrada da Introdução de Veículos Leves Conectáveis à Rede Elétrica no Sistema Energético Brasileiro.** 179p. Tese (Doutorado em Mestrado em Política Científica e Tecnológica). Campinas: Universidade Estadual de Campinas, 2012.

BRASIL. Casa Civil – Subchefia para Assuntos Jurídicos. **Decreto Nº 8.948, de 29 de Dezembro de 2016: Dispõe sobre o valor do salário mínimo e a sua política de valorização a longo prazo.** Brasília: Diário Oficial da União. Seção 1. p.12. 30/12/2016.

BURKE, Andrew F. **Batteries and Ultracapacitors for Electric, Hybrid and Fuel Cell Vehicles.** Proceedings of the IEEE. vol. 95. no. 4, 14p. 2007.

CAO, Jian; EMADI, Ali. **A New Battery/Ultracapacitor Hybrid Energy Storage System for Electric, Hybrid and Plug-in Hybrid Electric Vehicles.** IEEE Transactions on Power Electronics. vol. 27. no. 1. 10p. 2012.

CARRO ANTIGO. **Curiosidades.** Disponível em: <http://www.carroantigo.com/portugues/indice_ccal.htm>. Acesso em: 28 abr. 2016.

CASTRO, Jean César Fagundes. **Análise dos Impactos de uma Microrrede Conectada à um Alimentador.** 82p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica). Belo Horizonte: Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, 2015.

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **Curvas de Intensidade de Uso por Tipo de Veículo Automotor da Frota da Cidade de São Paulo.** 68p. Relatório. São Paulo: Secretaria de Meio Ambiente, 2013.

CEMIG – Companhia Energética de Minas Gerais. **Valores de Tarifas e Serviços – B1 Residencial Normal.** Disponível em: < https://www.cemig.com.br/pt-br/atendimento/Paginas/valores_de_tarifa_e_servicos.aspx>. Acesso em: 21 jan. 2017a.

CEMIG – Companhia Energética de Minas Gerais. **Simulador de Consumo.** Disponível em: < <http://portalcfu.cemig.com.br/SimuladorCFU/minha-casa/> >. Acesso em: 02 fev. 2017b.

CGEE, Centro de Gestão e Estudos Estratégicos. **Redes Elétricas Inteligentes: contexto nacional.** 176p. Série Documento Técnico. Brasília: CGEE, 2012.

CHAN, C.C. **The State of the Art of Electric, Hybrid and Fuel Cell Vehicles.** Proceedings of the IEEE, vol. 90, no. 2. 29p. 2002.

CHOI, Joseph. **The Fiat 500e Exemplifies FCA CEO's Disdain for EVs.** 20/06/2016. Disponível em: <<http://www.nada.com/b2b/NADAOutlook/UsedCarTruckBlog/tabid/96/entryid/940/the-fiat-500e-exemplifies-fca-ceo-s-disdain-for-evs.aspx>>. Acesso em: 27 out. 2016.

COMDC, Conheça o mundo dos carros. **Carros de história: Fiat 500.** 31/07/2011. Disponível em: <<http://conhecaomundodoscarros.blogspot.com.br/2011/07/carros-de-historia-fiat-500.html>>. Acesso em: 04 maio 2016.

CORTEZZI, Fernanda; JOTA, Patrícia. **Residential load curve analysis during electric vehicle charging.** Journal of Power and Energy Engineering, vol. 5. 12p. 2017.

DELGADO, Adriana Cáceres. **Algoritmo para Frenagem Regenerativa de uma Máquina Síncrona de Imã Permanente.** 117p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Campinas: Universidade Estadual de Campinas, 2010.

DUFFIE, Bruce. **A. L. Riker**. Disponível em: < <http://www.kcstudio.com/riker.html>>. Acesso em: 13 abr. 2016.

EPA – US Environmental Protection Agency. **Dynamometer Drive Schedules**. Disponível em: < <https://www.epa.gov/vehicle-and-fuel-emissions-testing/dynamometer-drive-schedules>>. Acesso em: 25 out. 2016.

FERREIRA, Tarcísio José Pedrobon. **Sistema de Gerenciamento de Energia para Controle de Carga/Descarga entre Baterias de Lítio e Ultracapacitores, envolvendo Sistema de Tração Elétrica com Frenagem Regenerativa**. 195p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Ilha Solteira: Universidade Estadual Paulista, 2014.

FIAT. **Manual de uso e manutenção Fiat 500**. Impresso 60355737 V/2015.
FIAT. **Fiat 500e 2016 User Guide**. 16BEV24-926-AA. Third Edition. 2016a.

FIAT. **Fiat 500e Owner's Manual 2016**. 16BEV24-126-AC. Third Edition. 2016b.

FIAT USA. **Meet the 2016 Fiat 500e**. Disponível em: < <http://www.fiatusa.com/en/2016/500e/>>. Acesso em: 12 maio 2016.

FIGUEIREDO, Sergio Ferreira de. **O carro a Álcool: Uma Experiência de Política Pública para a Inovação no Brasil**. 116p. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento Sustentável). Brasília: Universidade de Brasília, 2006.

FPA – Instituto Perseu Abramo. **Classes Sociais no Brasil de Hoje**. 86p. Revista FPA Discute, Edição 05.2013.

GAO, Yajing; GUO, Yandong. **Optimal Planning of Charging Station for Phased Electric Vehicle**. Journal Energy and Power Engineering. vol. 5. 5p. 2013.

GE ENERGY MANAGEMENT. **Soluções para Carregamento de Veículos Elétricos**. DuraStation – Catálogo de Produtos. Edição 08.2012.

GERBELLI, Luiz Guilherme. **Classe A tem maior fatia da renda do País**. 16/01/2016. Disponível em: < <http://economia.estadao.com.br/noticias/geral,classe-a-tem-maior-fatia-da-renda-do-pais,10000007285>>. Acesso em: 01 fev. 2017.

GURGEL 800. **Gurgel Itaipú – Especificações Técnicas**. Disponível em: < <http://www.gurgel800.com.br/gurgel/itaipu/>>. Acesso em: 30 abr. 2016.

HUSAIN, Iqbal. **Electric and Hybrid Vehicles: Design Fundamentals** 270p. Publinústria, CRC Press LCC, Boca Raton FL, 2003.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Educação e condições de vida**. Disponível em: < <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/condicaodevida/indicadoresminimos/tabelas3.shtm#a32>>. Acesso em: 10 mar. 2017.

IEA – International Energy Agency. **Technology Roadmap: Electric and Plug-in Hybrid Electric Vehicles**. Paris: International Energy Agency, 2011.

IEC – International Electrotechnical Commission. **Electric Vehicle Conductive Charging System – Part.1: General Requirements**. Brussels: European Committee for Electrotechnical Standardization, 2010.

ITAIPU. **Projeto Veículo Elétrico**. Disponível em: < <https://www.itaipu.gov.br/ve/>>. Acesso em: 01 maio. 2016.

ITS – Institute of Transportation Studies. **Who is Buying Electric Cars in California? Exploring Household and Vehicle Fleet Characteristics of New Plug-In Vehicle Owners**. Davis: University of California, 2013.

KOBAYASHI, Shigeki; PLOTKIN, Steven; RIBEIRO, Suzana K. **Energy Efficient Technologies for Road Vehicles**. Energy Efficiency, vol. 2. 12p. 2009.

LAVRINC, Damon. **This is The Next Best Thing to A Tesla, and I'm Buying One**. 17/04/2013. Disponível em: < <http://www.wired.com/2013/04/2013-fiat-500e/>>. Acesso em: 07 jul. 2016.

LENZ, André Luiz. **Freio Regenerativo (Sistema de Recuperação de Energia Cinética)**. 31/03/2013. Disponível em: < <http://automoveiseletricos.blogspot.com.br/2013/03/freio-regenerativo-sistema-de.html>>. Acesso em: 18 jul. 2016.

LOVATO ELECTRIC. **DMG200 – DMG210 Instructions Manual**. Disponível em: < http://www.lovatoelectric.cn/HandlerDoc.ashx?s=I269IGBFE11_13.pdf&ic=110>. Acesso em: 01 nov. 2016.

MARTINS, Jorge; BRITO, Francisco. **Carros Elétricos**. 1.ed. Porto: Publinústria, Edições Técnicas LTDA, 2011.

MACLEAN, Heather L.; LAVE, Lester B. **Evaluating Automobile Fuel/Propulsion System Technologies**. Progress in Energy and Combustion Science, vol. 29. 69p. 2002.

MUSÉE DES ARTS ET MÉTIERS. **Fardier**. Disponível em: < <http://www.arts-et-metiers.net/musee/fardier>>. Acesso em: 06 abr. 2016.

NISSAN. **2016 Nissan Leaf**. Disponível em: < <http://www.nissanusa.com/electric-cars/leaf/>>. Acesso em: 27 out. 2016.

NIST – National Institute of Standards and Technology. **Smart Grid: A Beginner's Guide**. 08/05/2013. Disponível em: < <http://www.nist.gov/smartgrid/beginnersguide.cfm>>. Acesso em: 23 ago 2016.

NOCE, Toshizaemom. **Estudo do Funcionamento de Veículos Elétricos e Contribuições ao seu Aperfeiçoamento**. 125p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Belo Horizonte: Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, 2009.

NUNES JUNIOR, Vicente. **Estudo das principais vantagens do uso da frenagem regenerativa em veículos híbridos**. 122p. Monografia (Pós-Graduação em Engenharia Automotiva). São Caetano do Sul: Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia, 2014.

OLIVEIRA, Eude C. **Modelagem e Simulação de Veículos Elétricos e Híbridos**. 107p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). São Paulo: Universidade de São Paulo, 2005.

PELLIZA, Giovani. **Análise de veículos convertidos para o uso do combustível gás natural**. 139p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Energia). Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2003.

PEREIRA, Elenita Malta. **O ouro negro**. 19p. Artigo – Revista Eletrônica Outros Tempos. São Luiz: Universidade Estadual do Maranhão, 2008.

PERRACINI, Renato. **Faróis de todos os tempos**. São Paulo: Editora Gráficos Burti, 1990.

PEW RESEARCH CENTER. **Are you in the American middle class ?**. 11/05/2016. Disponível em: < <http://www.pewsocialtrends.org/2016/05/11/are-you-in-the-american-middle-class/> >. Acesso em: 21 nov. 2016.

PLUGINCARS. **Fiat 500e Review**. Disponível em: < <http://www.plugincars.com/fiat-500e> >. Acesso em: 12 maio 2016.

PSA GROUPE. **História**. Disponível em: < <http://psa-peugeot-citroen.com.br/o-grupo-no-mundo/historia/> >. Acesso em: 28 abr. 2016.

RECORD GO. **Fiat 500: La historia de un icono**. 18/06/2015. Disponível em: <http://www.recordrentacar.com/alquiler_coches/blog/fiat-500-la-historia-de-un-icono/>. Acesso em: 28 abr. 2016.

RODRIGUEZ, Diego; AVILA, Carlos; MEIJA, Willian. **Impact of Electric Vehicle on Power System Operation: Technical Overview**. International Journal of Engineering Research & Technology, vol. 2. 8p. 2013.

ROSOLEM, Maria de Fátima; BECK, Raul Fernando; SANTOS, Glauco Ribeiro; ARIOLI, Vitor Torquato. **Bateria de lítio-íon: Conceitos básicos de potencialidades**. Caderno CPqD Tecnologia. vol. 8. no. 2. p. 59-72. 2012.

SB LIMOTIVE. **Fiat F500 EV Mule 3: Battery System Application Manual**. 2011.

U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. **Battery Test Manual for 12 Volt Start/Stop Vehicles**. 67p. Idaho: Idaho National Laboratory, 2015.

U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. **Fuel Properties Comparison**. 29/10/2014. Disponível em: < http://www.afdc.energy.gov/fuels/fuel_comparison_chart.pdf >. Acesso em: 02 out. 2016.

U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. **What is the Smart Grid?** Disponível em: <
https://www.smartgrid.gov/the_smart_grid/index.html>. Acesso em: 24 ago. 2016.

YAMAKAWA, Eduardo Kazumi. **Sistema de Controle Nebuloso para bancos de capacitores automáticos aplicados em alimentadores de distribuição de energia elétrica.** 151p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Elétrica). Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2007.

ANEXO A

As curvas de cargas utilizadas neste trabalho foram obtidas das curvas de carga típicas, retiradas por Yamakawa (2007), através de monitorações realizadas em circuitos de distribuição típicos.

Neste trabalho foram utilizados os dados referentes ao consumo de potência ativa e reativa nos dias úteis. Para cada consumidor foram considerados valores de consumo mensal que refletiram no consumo diário e na demanda máxima. Para a construção das curvas de carga em cada fase (L1, L2), a demanda máxima foi dividida por dois e multiplicada pelos valores em pu apresentados por Yamakawa (2007).

A.1 Curva de carga residencial de classe média

Para o consumidor de classe média foi considerado o consumo mensal de 300 kWh, o que corresponde ao consumo diário de 10 kWh e demanda máxima de 847 W. Na Tabela A1 encontram-se os valores de potência ativa e reativa, consumidos ao longo de um dia útil, obtidos em intervalos de 10 minutos.

Tabela 28: Dados da curva de carga residencial de classe média

Horas do dia [h:min]	Ativa [kW]	Reativa [kVar]
0:00	0,348	0,200
0:10	0,319	0,187
0:20	0,345	0,205
0:30	0,330	0,201
0:40	0,284	0,215
0:50	0,277	0,213
1:00	0,264	0,203
1:10	0,258	0,201
1:20	0,252	0,195
1:30	0,243	0,187
1:40	0,248	0,186
1:50	0,274	0,210
2:00	0,290	0,198
2:10	0,240	0,185
2:20	0,256	0,199
2:30	0,277	0,175

Horas do dia [h:min]	Ativa [kW]	Reativa [kVar]
2:40	0,251	0,195
2:50	0,274	0,193
3:00	0,306	0,174
3:10	0,273	0,179
3:20	0,255	0,181
3:30	0,250	0,189
3:40	0,251	0,190
3:50	0,247	0,182
4:00	0,270	0,192
4:10	0,317	0,191
4:20	0,274	0,212
4:30	0,273	0,186
4:40	0,284	0,168
4:50	0,299	0,186
5:00	0,366	0,174
5:10	0,415	0,195
5:20	0,543	0,196
5:30	0,528	0,171
5:40	0,367	0,163
5:50	0,357	0,194
6:00	0,323	0,170
6:10	0,297	0,213
6:20	0,340	0,219
6:30	0,305	0,219
6:40	0,237	0,226
6:50	0,285	0,192
7:00	0,341	0,191
7:10	0,391	0,188
7:20	0,385	0,202
7:30	0,392	0,200
7:40	0,315	0,215
7:50	0,247	0,224
8:00	0,291	0,252
8:10	0,289	0,236
8:20	0,299	0,224
8:30	0,302	0,233
8:40	0,373	0,254
8:50	0,361	0,255
9:00	0,340	0,227
9:10	0,330	0,235
9:20	0,309	0,210
9:30	0,311	0,196
9:40	0,343	0,199
9:50	0,350	0,227
10:00	0,474	0,230
10:10	0,455	0,242
10:20	0,331	0,219
10:30	0,352	0,230
10:40	0,282	0,224
10:50	0,346	0,226
11:00	0,425	0,219
11:10	0,302	0,211
11:20	0,377	0,229
11:30	0,342	0,220

Horas do dia [h:min]	Ativa [kW]	Reativa [kVar]
11:40	0,333	0,231
11:50	0,271	0,236
12:00	0,284	0,224
12:10	0,328	0,250
12:20	0,315	0,247
12:30	0,302	0,239
12:40	0,250	0,205
12:50	0,297	0,224
13:00	0,335	0,204
13:10	0,254	0,204
13:20	0,286	0,205
13:30	0,305	0,222
13:40	0,292	0,196
13:50	0,287	0,225
14:00	0,337	0,208
14:10	0,341	0,243
14:20	0,285	0,210
14:30	0,263	0,201
14:40	0,241	0,199
14:50	0,268	0,233
15:00	0,328	0,209
15:10	0,332	0,176
15:20	0,370	0,198
15:30	0,341	0,217
15:40	0,500	0,229
15:50	0,433	0,247
16:00	0,439	0,219
16:10	0,351	0,235
16:20	0,319	0,218
16:30	0,475	0,230
16:40	0,489	0,230
16:50	0,566	0,239
17:00	0,547	0,219
17:10	0,473	0,201
17:20	0,693	0,222
17:30	0,818	0,247
17:40	0,596	0,233
17:50	0,685	0,209
18:00	0,581	0,202
18:10	0,580	0,228
18:20	0,728	0,224
18:30	0,644	0,231
18:40	0,761	0,237
18:50	0,658	0,236
19:00	0,734	0,236
19:10	0,797	0,236
19:20	0,734	0,220
19:30	0,648	0,207
19:40	0,752	0,222
19:50	0,679	0,224
20:00	0,801	0,256
20:10	0,821	0,230
20:20	0,752	0,209
20:30	0,742	0,227

Horas do dia [h:min]	Ativa [kW]	Reativa [kVar]
20:40	0,688	0,230
20:50	0,721	0,229
21:00	0,720	0,217
21:10	0,676	0,208
21:20	0,730	0,206
21:30	0,802	0,205
21:40	0,720	0,245
21:50	0,699	0,232
22:00	0,629	0,216
22:10	0,662	0,191
22:20	0,481	0,210
22:30	0,503	0,213
22:40	0,490	0,203
22:50	0,537	0,216
23:00	0,504	0,205
23:10	0,430	0,191
23:20	0,376	0,208
23:30	0,440	0,210
23:40	0,387	0,198
23:50	0,416	0,222

Fonte: Elaboração própria do autor

A.2 Curva de carga residencial de classe alta

Para o consumidor de classe alta foi considerado o consumo de 500 kWh/mês, o que corresponde ao consumo diário de 16,67 kWh e demanda máxima de 1,231 kW. Os valores de potência ativa e reativa consumidos ao longo de um dia útil encontram-se na Tabela A2, em intervalos de 10 minutos.

Tabela 29: Dados da curva de carga residencial de classe alta

Horas do dia [h:min]	Ativa [kW]	Reativa [kVar]
0:00	0,943	0,361
0:10	0,929	0,328
0:20	0,852	0,315
0:30	0,892	0,365
0:40	0,845	0,323
0:50	0,851	0,329
1:00	0,802	0,348
1:10	0,784	0,347

Horas do dia [h:min]	Ativa [kW]	Reativa [kVar]
1:20	0,728	0,325
1:30	0,726	0,308
1:40	0,729	0,340
1:50	0,741	0,317
2:00	0,727	0,312
2:10	0,707	0,278
2:20	0,736	0,299
2:30	0,683	0,297
2:40	0,625	0,322
2:50	0,603	0,310
3:00	0,596	0,287
3:10	0,595	0,286
3:20	0,607	0,316
3:30	0,666	0,317
3:40	0,589	0,278
3:50	0,630	0,292
4:00	0,616	0,322
4:10	0,613	0,316
4:20	0,596	0,289
4:30	0,602	0,274
4:40	0,640	0,284
4:50	0,615	0,296
5:00	0,628	0,323
5:10	0,605	0,314
5:20	0,570	0,296
5:30	0,598	0,301
5:40	0,533	0,316
5:50	0,536	0,299
6:00	0,470	0,287
6:10	0,444	0,312
6:20	0,468	0,318
6:30	0,418	0,236
6:40	0,467	0,252
6:50	0,451	0,295
7:00	0,355	0,278
7:10	0,393	0,278
7:20	0,409	0,264
7:30	0,413	0,276
7:40	0,512	0,330
7:50	0,499	0,293
8:00	0,536	0,314
8:10	0,519	0,310
8:20	0,536	0,305
8:30	0,514	0,352
8:40	0,516	0,368
8:50	0,586	0,359
9:00	0,518	0,344
9:10	0,493	0,317
9:20	0,501	0,322
9:30	0,540	0,392
9:40	0,565	0,366
9:50	0,538	0,355
10:00	0,639	0,450
10:10	0,696	0,419

Horas do dia [h:min]	Ativa [kW]	Reativa [kVar]
10:20	0,638	0,425
10:30	0,582	0,399
10:40	0,606	0,388
10:50	0,649	0,430
11:00	0,668	0,514
11:10	0,669	0,478
11:20	0,672	0,521
11:30	0,782	0,513
11:40	0,751	0,506
11:50	0,687	0,506
12:00	0,693	0,469
12:10	0,721	0,521
12:20	0,722	0,536
12:30	0,673	0,474
12:40	0,630	0,441
12:50	0,669	0,428
13:00	0,581	0,403
13:10	0,606	0,448
13:20	0,636	0,449
13:30	0,678	0,451
13:40	0,677	0,462
13:50	0,638	0,430
14:00	0,631	0,444
14:10	0,649	0,420
14:20	0,593	0,396
14:30	0,554	0,396
14:40	0,590	0,444
14:50	0,639	0,455
15:00	0,606	0,415
15:10	0,543	0,371
15:20	0,548	0,376
15:30	0,605	0,409
15:40	0,613	0,373
15:50	0,551	0,346
16:00	0,556	0,383
16:10	0,544	0,396
16:20	0,508	0,367
16:30	0,503	0,356
16:40	0,496	0,373
16:50	0,521	0,390
17:00	0,523	0,409
17:10	0,434	0,376
17:20	0,519	0,391
17:30	0,586	0,380
17:40	0,657	0,368
17:50	0,533	0,323
18:00	0,633	0,349
18:10	0,658	0,373
18:20	0,862	0,390
18:30	0,874	0,355
18:40	1,053	0,362
18:50	1,079	0,373
19:00	1,074	0,399
19:10	0,911	0,397

Horas do dia [h:min]	Ativa [kW]	Reativa [kVar]
19:20	1,013	0,365
19:30	0,995	0,385
19:40	0,984	0,385
19:50	0,884	0,378
20:00	0,953	0,390
20:10	0,991	0,390
20:20	1,128	0,385
20:30	1,231	0,385
20:40	1,013	0,363
20:50	1,068	0,342
21:00	1,105	0,333
21:10	1,020	0,322
21:20	0,924	0,321
21:30	0,911	0,359
21:40	0,884	0,353
21:50	0,891	0,369
22:00	0,918	0,324
22:10	0,997	0,317
22:20	0,975	0,350
22:30	0,968	0,327
22:40	0,931	0,329
22:50	0,903	0,347
23:00	0,862	0,328
23:10	0,903	0,341
23:20	0,891	0,348
23:30	0,906	0,350
23:40	0,886	0,325
23:50	0,860	0,358

Fonte: Elaboração própria do autor

A.3 Curva de carga de um estabelecimento comercial

Para o consumidor de um estabelecimento comercial foi considerado o consumo de 1800 kWh/mês, o que corresponde ao consumo diário de 60 kWh e demanda máxima de 3,874 kW. Os valores de potência ativa e reativa consumidos ao longo de um dia útil encontram-se na Tabela A3, em intervalos de 10 minutos.

Tabela 30: Dados da curva de carga de um estabelecimento comercial

Horas do dia [h:min]	Ativa [kW]	Reativa [kVar]
0:00	0,814	0,648
0:10	0,779	0,607
0:20	0,800	0,636
0:30	0,811	0,624

Horas do dia [h:min]	Ativa [kW]	Reativa [kVar]
0:40	0,852	0,666
0:50	0,785	0,607
1:00	0,803	0,642
1:10	0,773	0,607
1:20	0,788	0,624
1:30	0,750	0,598
1:40	0,803	0,689
1:50	0,788	0,654
2:00	0,811	0,686
2:10	0,759	0,619
2:20	0,873	0,721
2:30	1,290	0,928
2:40	1,395	1,027
2:50	1,395	1,051
3:00	1,352	1,013
3:10	1,381	1,054
3:20	1,471	0,984
3:30	1,775	0,870
3:40	1,982	0,881
3:50	2,000	0,852
4:00	2,008	0,913
4:10	2,175	1,056
4:20	2,148	0,969
4:30	2,341	0,987
4:40	2,061	0,922
4:50	2,131	0,957
5:00	2,090	0,884
5:10	2,300	0,884
5:20	2,219	0,975
5:30	2,399	1,039
5:40	2,236	1,083
5:50	2,230	1,071
6:00	2,215	1,103
6:10	2,353	1,074
6:20	2,461	1,130
6:30	2,391	1,118
6:40	2,338	1,144
6:50	2,198	1,162
7:00	2,353	1,150
7:10	2,662	1,156
7:20	2,592	1,211
7:30	3,010	1,141
7:40	2,849	1,176
7:50	3,103	1,278
8:00	3,228	1,395
8:10	3,156	1,401
8:20	3,237	1,375
8:30	3,293	1,325
8:40	2,968	1,299
8:50	3,100	1,293
9:00	3,118	1,305
9:10	3,357	1,390
9:20	3,339	1,284
9:30	3,494	1,407

Horas do dia [h:min]	Ativa [kW]	Reativa [kVar]
9:40	3,570	1,386
9:50	3,412	1,366
10:00	3,546	1,445
10:10	3,698	1,424
10:20	3,663	1,433
10:30	3,719	1,421
10:40	3,649	1,489
10:50	3,517	1,468
11:00	3,430	1,401
11:10	3,234	1,401
11:20	3,082	1,398
11:30	3,112	1,398
11:40	3,293	1,532
11:50	3,345	1,442
12:00	3,307	1,398
12:10	3,357	1,518
12:20	3,141	1,430
12:30	3,295	1,436
12:40	3,354	1,465
12:50	3,319	1,413
13:00	3,202	1,495
13:10	3,357	1,453
13:20	3,456	1,486
13:30	3,500	1,486
13:40	3,441	1,518
13:50	3,424	1,509
14:00	3,389	1,556
14:10	3,564	1,652
14:20	3,637	1,643
14:30	3,652	1,673
14:40	3,523	1,553
14:50	3,517	1,541
15:00	3,649	1,670
15:10	3,617	1,687
15:20	3,658	1,704
15:30	3,678	1,769
15:40	3,734	1,763
15:50	3,874	1,807
16:00	3,637	1,713
16:10	3,804	1,810
16:20	3,605	1,766
16:30	3,584	1,620
16:40	3,541	1,614
16:50	3,445	1,635
17:00	3,018	1,474
17:10	3,141	1,360
17:20	3,240	1,419
17:30	2,837	1,372
17:40	2,823	1,453
17:50	2,855	1,424
18:00	2,744	1,398
18:10	2,723	1,413
18:20	2,604	1,337
18:30	2,531	1,238

Horas do dia [h:min]	Ativa [kW]	Reativa [kVar]
18:40	2,840	1,352
18:50	2,726	1,214
19:00	2,788	1,281
19:10	2,829	1,208
19:20	2,875	1,162
19:30	2,659	1,194
19:40	2,750	1,179
19:50	2,446	1,185
20:00	2,361	1,188
20:10	2,449	1,202
20:20	2,373	1,176
20:30	2,578	1,246
20:40	2,665	1,206
20:50	2,265	1,153
21:00	2,189	1,191
21:10	2,280	1,211
21:20	2,598	1,130
21:30	2,289	1,211
21:40	2,224	1,229
21:50	1,988	1,121
22:00	1,664	0,814
22:10	1,135	0,703
22:20	1,074	0,683
22:30	1,153	0,747
22:40	1,121	0,712
22:50	1,118	0,750
23:00	0,995	0,776
23:10	0,905	0,729
23:20	0,800	0,633
23:30	0,838	0,686
23:40	0,867	0,724
23:50	0,931	0,788

Fonte: Elaboração própria do autor