



**Universidade do Estado do Rio de Janeiro**

**Centro de Ciência e Tecnologia**

**Faculdade de Engenharia**

**Windson Braga Pereira**

**Metodologia de análise do abastecimento de veículos elétricos  
no contexto das redes inteligentes de energia**

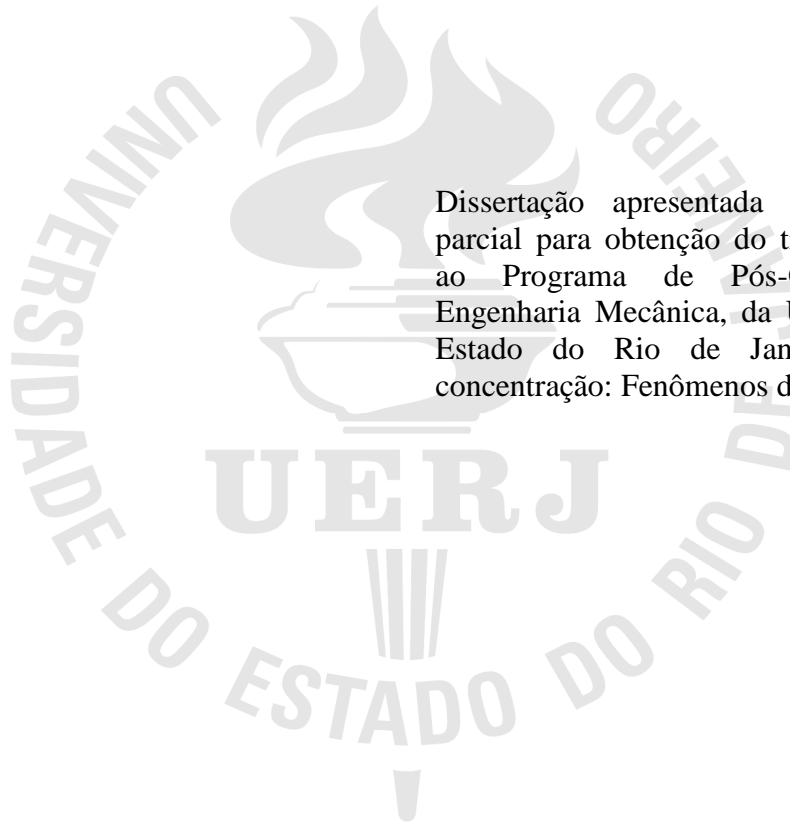
Rio de Janeiro

2015

Windson Braga Pereira

**Metodologia de análise do abastecimento de veículos elétricos  
no contexto das redes inteligentes de energia**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Fenômenos de Transporte.



Orientador: Prof. Dr. Luiz Artur Pecorelli Peres

Coorientador: Prof. Dr. José Francisco Moreira Pessanha

Rio de Janeiro

2015

CATALOGAÇÃO NA FONTE  
UERJ / REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CTC/B

P436 Pereira, Windson Braga.  
Metodologia de análise do abastecimento de veículos elétricos  
no contexto das redes inteligentes de energia / Windson Braga  
Pereira. - 2015.  
162 f.

Orientador: Luiz Artur Pecorelli Peres.

Coorientador: José Francisco Moreira Pessanha.

Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado do Rio de  
Janeiro, Faculdade de Engenharia.

1. Engenharia Mecânica. 2. Veiculos eletricos – Abastecimento  
de energia – Dissertações. 3. Redes inteligentes de energia –  
Dissertações. 4. Emissões veiculares – Dissertações. I. Peres, Luiz  
Artur Pecorelli. II. Pessanha, José Francisco Moreira. III.  
Universidade do Estado do Rio de Janeiro. IV. Título.

CDU 004.89:629.113.6

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta  
dissertação, desde que citada a fonte.

---

Assinatura

---

Data

Windson Braga Pereira

**Metodologia de análise do abastecimento de veículos elétricos  
no contexto das redes inteligentes de energia**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Fenômenos de Transporte.

Aprovada em 03 de setembro de 2015.

Banca Examinadora:

---

Prof. Dr. Luiz Artur Pecorelli Peres (Orientador)

Faculdade de Engenharia – UERJ

---

Prof. Dr. José Francisco Moreira Pessanha (Coorientador)

Instituto de Matemática e Estatística – UERJ

---

Prof. Dr. Antonio Guilherme Garcia Lima

Faculdade de Engenharia – UERJ

---

Prof. Dr. Paulo Eduardo Darski Rocha

Faculdade de Engenharia – UERJ

---

Prof. Dr. Glauco Nery Taranto

Universidade Federal do Rio de Janeiro

---

Prof. Dr. João Carlos de Oliveira Aires

Universidade Santa Úrsula

Rio de Janeiro

2015

## DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à pessoa que mais vibrava com minhas conquistas, principalmente as acadêmicas, falava com orgulho da minha dedicação e tinha certeza do meu sucesso profissional, ao meu pai José Reinaldo da Costa Pereira.

Ele foi um companheiro dedicado à esposa e não mediu esforços para proporcionar aos filhos a melhor educação que pôde. O que ele não soube foi que o bem mais valioso que ele deu a mim e a meu irmão foi o caráter!

Infelizmente ele não pôde estar presente na conclusão deste trabalho, pois, poucos meses antes, Deus achou que já estava na hora de tirá-lo do sofrimento e da dor que o câncer lhe causava, mesmo ele nunca tendo se entregado à doença. Ele lutou até o fim e, como um verdadeiro chefe de família, poupou todos do sofrimento não se deixando abater. Foi o melhor amigo, um excelente marido e um pai exemplar até o final de sua vida.

*“Pai, onde quer que o senhor esteja, eu sei que está orgulhoso de mim e vibrando mais uma vez comigo, por isso, dedico-lhe este trabalho com todo meu carinho. Saiba que tenho muito orgulho do maravilhoso pai que eu tive. Eu te amarei para sempre e nunca te esquecerei! Obrigado por tudo!”*

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, pela minha vida e pela força para superar dificuldades e perdas ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

A toda minha família, em especial à minha mãe Regina de Lourdes Braga Pereira, ao meu irmão Wanderson Braga Pereira, ao meu pai José Reinando da Costa Pereira, que foi levado por Deus poucos meses antes da conclusão deste trabalho, e à minha namorada Madellon Fernandes Theodoro, que, com muito amor, me incentivaram e me apoiaram nos momentos mais difíceis.

A Universidade do Estado do Rio de Janeiro – UERJ, em especial ao meu orientador Luis Artur Pecorelli Peres e ao meu coorientador José Francisco Moreira Pessanha que, com sabedoria e paciência, me mostraram o melhor caminho para a elaboração bem sucedida desta dissertação. Não esquecendo dos professores José Júlio Pedrosa Filho, Rogério Martins Saldanha da Gama e Mauro Carlos Lopes Sousa do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica – PPG-EM da UERJ, que também contribuíram de forma majestosa com seus ensinamentos.

A Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro – FAPERJ, pelo suporte de recursos para a realização desta pesquisa.

A Ampla Energia e Serviços S.A. e à Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, pela oportunidade de desenvolver este trabalho no contexto do projeto Cidade Inteligente Búzios.

A equipe do Laboratório de Sistemas de Propulsão Veicular e Fontes Eletroquímicas – LSPV, em especial aos engenheiros Marcos Lellis Pacífico Peçanha e André Rodrigues Krempser, e ao estudante de graduação Ranther Ferreira de Melo, pelo apoio e auxílio durante a realização dos ensaios que culminaram na metodologia aqui apresentada.

Um homem sábio pode aprender mais com uma pergunta tola  
do que um tolo pode aprender com uma resposta sábia.

*Bruce Lee*

## RESUMO

PEREIRA, Windson Braga. *Metodologia de análise do abastecimento de veículos elétricos no contexto das redes inteligentes de energia*. 2015. 162 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

Este trabalho apresenta um modelo de simulação para avaliação da recarga de veículos elétricos em redes de distribuição de energia, com foco na adequação da capacidade dos transformadores. Com base em medições efetuadas, foi possível o tratamento dos dados para a modelagem de curvas de recarga de veículos elétricos e a análise do acréscimo da demanda da recarga em transformadores de distribuição. O modelo de simulação permite avaliar os efeitos das variáveis relacionadas à distância percorrida e ao horário da conexão dos veículos elétricos à rede, tanto de forma determinística quanto de forma aleatória. Estes efeitos foram comparados e permitiram concluir a importância da utilização deste método mais realista para calcular a capacidade dos transformadores, visando suprir esta nova demanda. Além disso, o trabalho apresenta indicadores dos benefícios ambientais e energéticos da penetração dos veículos elétricos no que diz respeito ao gasto com reabastecimento e às emissões evitadas, respectivamente, ao se utilizar veículos elétricos à bateria em substituição aos tradicionais veículos à combustão interna.

Palavras-chave: Recarga de Veículos Elétricos; Simulação; Redes Inteligentes de Energia; Meio Ambiente; Emissões.



## ABSTRACT

PEREIRA, Windson Braga. *Analysis methodology of supply of electric vehicles in the context of energy intelligent networks*. 2015. 162 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

This paper presents a simulation model to evaluate the recharging of electric vehicles in power distribution networks, focusing on the adequacy of the capacity of transformers. Based on measurements made, it was possible the processing of data for modeling recharge curves of electric vehicles and the analysis of charging the demand increase in distribution transformers. The simulation model allows evaluating the effects of variables related to the distance traveled and the time the connection of electric vehicles to the power grid, both deterministically as randomly. These effects were compared and allowed to conclude the importance of using this more realistic method to calculate the capacity of transformers, in order to meet this new demand. In addition, the paper presents indicators of the environmental and energy benefits of penetration of electric vehicles with regard to spending on refueling and avoided emissions, respectively, when using battery electric vehicles to replace the traditional internal combustion vehicles.

Keywords: Recharge of Electric Vehicles; Simulation; Smart Grid; Environment; Emissions.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Esquema da abordagem e solução de um fenômeno físico .....	44
Figura 1.2 – Fluxo médio de energia <i>Tank-To-Wheel</i> .....	50
Figura 1.3 – Fluxo médio de energia <i>Battery-To-Wheel</i> .....	51
Figura 1.4 – Interpretação gráfica da energia e da coenergia .....	66
Figura 1.5 – Ciclo de condução baseado no ciclo SAE-J227 .....	74
Figura 1.6 – Força de tração durante o ciclo de condução.....	77
Figura 1.7 – Potência do motor durante o ciclo de condução .....	77
Figura 1.8 – Procedimento de cálculo da probabilidade .....	83
Figura 1.9 – Ilustração de $Fa$ .....	83
Figura 1.10 – Função distribuição cumulativa da função uniforme.....	85
Figura 1.11 – Função Densidade de Probabilidade Lognormal.....	87
Figura 2.1 – Mapa do trajeto do ensaio de percurso do Palio Weekend Elétrico .....	94
Figura 2.2 – Estado de carga da bateria do Palio Weekend Elétrico durante o percurso.....	94
Figura 2.3 – Tensão da bateria do Palio Weekend Elétrico durante o percurso .....	95
Figura 2.4 – Ensaio de percurso do Palio Weekend Elétrico.....	95
Figura 2.5 – Ensaio de percurso da bicicleta elétrica.....	97
Figura 2.6 – Orientador e autor do trabalho após ensaio de percurso.....	97
Figura 2.7 – Equipe do LSPV responsável pelos ensaios .....	98
Figura 2.8 – Tensão (V) e corrente (I) durante a recarga.....	99
Figura 2.9 – Potências ativa (P) e reativa (Q) durante a recarga.....	100
Figura 2.10 – Potência aparente (S) e fator de potência (FP) durante a recarga.....	100
Figura 2.11 – Palio Weekend Elétrico sendo recarregado .....	101
Figura 2.12 – Tensão durante a recarga .....	102
Figura 2.13 – Corrente durante a recarga.....	103
Figura 2.14 – Potências ativa, reativa e aparente durante a recarga .....	103
Figura 2.15 – Fator de potência durante a recarga .....	103
Figura 2.16 – Reposição da energia durante a recarga.....	104
Figura 2.17 – Bicicleta elétrica LEV durante ensaio de recarga.....	105
Figura 2.18 – Curva de recarga da autonomia do Palio Weekend Elétrico .....	109
Figura 2.19 – Curva de recarga da autonomia da bicicleta elétrica LEV .....	109
Figura 2.20 – Fluxograma das simulações decorrentes da aplicação da metodologia.....	115

Figura 3.1 – Esquema de uma simulação probabilística .....	116
Figura 3.2 – Curva de demanda do transformador de distribuição .....	119
Figura 3.3 – Curva de demanda das simulações .....	119
Figura 3.4 – Curva de recarga do carro para 80 % da autonomia.....	120
Figura 3.5 – Carregamento da frota de carros e curva de demanda com a frota.....	121
Figura 3.6 – Curva de recarga da bicicleta para 80 % da autonomia.....	122
Figura 3.7 – Carregamento da frota de bicicletas e curva de demanda com a frota .....	122
Figura 3.8 – Carregamento das frotas e curva de demanda com as frotas .....	123
Figura 3.9 – Distribuição lognormal da distância percorrida pela frota de carros .....	126
Figura 3.10 – Carregamento da frota de carros e curva de demanda com a frota.....	126
Figura 3.11 – Distribuição lognormal da distância percorrida pela frota de bicicletas.....	127
Figura 3.12 – Carregamento da frota de carros e curva de demanda com a frota.....	127
Figura 3.13 – Distribuição lognormal da distância percorrida pelas frotas .....	128
Figura 3.14 – Carregamento das frotas de carros e de bicicletas .....	129
Figura 3.15 – Carregamento das frotas e curva de demanda com as frotas .....	129
Figura 3.16 – Distribuição lognormal do horário de conexão da frota de carros.....	131
Figura 3.17 – Carregamento da frota de carros e curva de demanda com a frota.....	131
Figura 3.18 – Distribuição lognormal do horário de conexão da frota de bicicletas .....	132
Figura 3.19 – Carregamento da frota de bicicletas e curva de demanda com a frota .....	132
Figura 3.20 – Distribuição lognormal do horário de conexão das frotas .....	133
Figura 3.21 – Carregamento das frotas de carros e de bicicletas .....	134
Figura 3.22 – Carregamento das frotas e curva de demanda com as frotas .....	134
Figura 3.23 – Lognormais do horário de conexão e da distância percorrida para os carros..	136
Figura 3.24 – Carregamento da frota de carros e curva de demanda com a frota.....	137
Figura 3.25 – Distribuição conjunta das distâncias percorridas e dos horários de conexão ..	137
Figura 3.26 – Lognormais do horário de conexão e da distância percorrida para as bicicletas .....	138
Figura 3.27 – Carregamento da frota de bicicletas e curva de demanda com a frota .....	139
Figura 3.28 – Distribuição conjunta das distâncias percorridas e dos horários de conexão ..	139
Figura 3.29 – Lognormais do horário de conexão e da distância percorrida para os carros..	140
Figura 3.30 – Lognormais do horário de conexão e da distância percorrida para as bicicletas .....	141
Figura 3.31 – Carregamento das frotas de carros e de bicicletas .....	141
Figura 3.32 – Carregamento das frotas e curva de demanda com as frotas .....	142

Figura 3.33 – Distribuição conjunta das distâncias percorridas e dos horários de conexão para a frota de carros elétricos .....	142
Figura 3.34 – Distribuição conjunta das distâncias percorridas e dos horários de conexão para a frota de bicicletas elétricas .....	143
Figura 3.35 – CV para distância percorrida como variável aleatória.....	145
Figura 3.36 – CV para horário de conexão como variável aleatória.....	146
Figura 3.37 – CV para distância e horário como variáveis aleatórias.....	146

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1	– Consumo total de energia por setor no Brasil.....	14
Tabela 2	– Fontes de consumo de energia no setor de transportes no Brasil .....	14
Tabela 3	– Geração total de energia elétrica.....	15
Tabela 4	– Emissão de CO2 pelo setor de transportes no Brasil.....	15
Tabela 5	– Emissão de CO2 por veículo no Brasil.....	16
Tabela 1.1	– Consumo de energia por fonte no transporte rodoviário .....	49
Tabela 1.2	– Oferta de energia elétrica do país .....	51
Tabela 1.3	– Valores das variáveis das forças que compõem a força total de tração.....	76
Tabela 2.1	– Dados do ensaio de percurso do Palio Weekend Elétrico .....	96
Tabela 2.2	– Dados do banco de baterias do Palio Weekend Elétrico .....	99
Tabela 2.3	– Valores medidos durante o teste de recarga .....	99
Tabela 2.4	– Dados da bateria da bicicleta elétrica .....	101
Tabela 2.5	– Valores medidos durante o teste de recarga da bicicleta elétrica .....	102
Tabela 3.1	– Dados do transformador de 75 kVA e da sua curva de demanda típica .....	118
Tabela 3.2	– Resultados numéricos da simulação determinística .....	124
Tabela 3.3	– Resultados numéricos da simulação probabilística da distância percorrida ....	130
Tabela 3.4	– Resultados numéricos da simulação probabilística do horário de conexão.....	135
Tabela 3.5	– Resultados numéricos da simulação probabilística de ambas as variáveis.....	144
Tabela 3.6	– Comparação da demanda máxima do transformador nas simulações .....	147
Tabela 3.7	– Comparação do fator de carga do transformador nas simulações .....	148
Tabela 3.8	– Comparação do fator de diversidade da distância percorrida .....	149
Tabela 3.9	– Comparação do fator de diversidade da conexão dos VEs.....	149
Tabela 3.10	– Comparação do fator de diversidade da energia gasta.....	150
Tabela A.1	– Emissões do Gol 1.0 Flex .....	159
Tabela A.2	– Estimativa das emissões do Gol 1.0 Flex .....	160
Tabela B.1	– Consumo energético do VW Gol 1.0 Flex e do Nissan Leaf.....	161
Tabela B.2	– Comparação da energia gasta com reabastecimento de VCI e VEBs.....	161

## SUMÁRIO

INTRODUÇÃO.....	13
1 REFERENCIAL TEÓRICO.....	40
1.1 Fenômenos de Transporte.....	40
1.2 Sistemas de Energia para Veículos de Transporte.....	48
1.3 Abastecimento de Energia de Veículos Elétricos Rodoviários.....	53
1.4 Conversão Eletromecânica de Energia.....	57
1.5 Veículos Elétricos.....	67
1.5.1 <u>Veículos Elétricos de Referência</u> .....	72
1.6 Simulações de Sistemas de Natureza Aleatória.....	78
2 METODOLOGIA.....	88
2.1 Caracterização da Recarga de Veículos Elétricos à Bateria.....	88
2.2 Efeito da Recarga de Veículos Elétricos em Transformadores.....	89
2.3 Normas Brasileiras Referentes à Recarga de Veículos Elétricos.....	91
2.4 Curva de Recarga de Veículos Rodoviários Leves e Ciclomotores Elétricos.....	92
2.4.1 <u>Ensaio de Percurso</u> .....	93
2.4.2 <u>Ensaio de Recarga</u> .....	98
2.5 Modelagem da Curva de Recarga de Veículos Elétricos.....	105
2.6 Superposição da Curva de Recarga na Curva de Demanda.....	110
2.7 Fluxograma das Simulações.....	114
3 RESULTADO, ANÁLISE E DISCUSSÃO.....	116
3.1 Simulação Computacional.....	116
3.2 Cenário do Trabalho.....	117
3.3 Resultados da Simulação Determinística.....	120
3.4 Resultados da Simulação Probabilística.....	124
3.4.1 <u>Variável Aleatória: Distância Percorrida</u> .....	125
3.4.2 <u>Variável Aleatória: Horário de Conexão</u> .....	130
3.4.3 <u>Variáveis Aleatórias: Distância Percorrida e Horário de Conexão</u> .....	135
3.5 Precisão das Estimativas.....	144
3.6 Comparação dos Resultados das Simulações.....	147
CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	151
REFERÊNCIAS.....	155
APÊNDICE A – Estimativa de Emissões Evitadas.....	159
APÊNDICE B – Comparação do Consumo Energético dos VCIs e dos VEBs.....	161

## INTRODUÇÃO

### Motivação e Justificativa

#### **Análise da Matriz Energética Brasileira**

O Brasil possui um imenso potencial hidrelétrico e a possibilidade de explorar outras fontes abundantes de energia (biomassa, eólica, solar). Dada a promissora exploração de petróleo e gás natural nos achados na camada pré-sal, é necessário modificar a atual utilização das fontes primárias de energia. O aumento significativo da produção de combustíveis fósseis e de etanol para suprir os veículos tradicionais, sem uma política pública para os veículos elétricos (VEs), não é uma boa estratégia. A penetração de VEs no mercado permite a utilização mais eficiente dos combustíveis fósseis disponíveis e da cana-de-açúcar, transformando parte deles em eletricidade, se necessário, para completar as necessidades da matriz energética. Isto reduzirá o montante de energia para o transporte, bem como as emissões de CO<sub>2</sub> nos próximos anos, porque a eletricidade é mais eficiente, como demonstrado em várias análises internacionais. Assim, coloca-se a perspectiva de obtenção de excedentes que, ao invés de serem meramente queimados internamente, podem com vantagem ser colocados à disposição das exportações tão necessárias para o desenvolvimento brasileiro. Atender o setor de transporte com menos energia, este deve ser o objetivo estratégico, segundo [DOMINGUES, 2013]. Os VEs são extremamente versáteis: eles podem ser recarregados a partir de diversas fontes de energia, diferentemente dos veículos à combustão interna.

Deve ser dada atenção à dimensão do setor de transportes no total do consumo de energia no Brasil. Então, tendo por base o ano de 2013, o setor dos transportes figura como o segundo maior consumidor de energia (28,1 %), sendo o setor industrial o primeiro (29,8 %), como mostra a Tabela 1.

Ademais, desde a década de 1970, o setor de transportes tem apresentado uma tendência permanente de aumento no consumo de energia, de acordo com o Ministério de Minas e Energia (MME). Há também uma consciência clara de que os combustíveis fósseis são a principal fonte de energia utilizada no setor, o que representa 77,5 % do montante total

disponível. Fontes mais limpas, como a hidroeletricidade, são deixadas com as taxas mínimas de consumo (0,2%), de acordo com a Tabela 2.

Tabela 1 – Consumo total de energia por setor no Brasil

<b>Setor</b>	<b>Porcentagem</b>
Energético	8,8 %
Comercial	2,7 %
Público	1,3 %
Residencial	8,0 %
Agropecuário	3,6 %
Transportes	28,1 %
Industrial	29,8 %
Outros	17,7 %
<b>Total</b>	<b>100,0 %</b>

Fonte: DOMINGUES, 2013.

Tabela 2 – Fontes de consumo de energia no setor de transportes no Brasil

<b>Fonte de Energia</b>	<b>Porcentagem</b>
Gás Natural	2,0 %
Óleo Diesel	46,2 %
Gasolina Automotiva	29,3 %
Eletricidade	0,2 %
Álcool Etílico	14,3 %
Outros	8,0 %
<b>Total</b>	<b>100 %</b>

Fonte: DOMINGUES, 2013.

A situação é ainda mais frustrante quando se olham as estatísticas sobre a evolução do consumo do setor de derivados de petróleo e energia elétrica, por exemplo, comparando 1973 e 2006. O consumo de derivados de petróleo no setor dos transportes aumentou de 45,4 % em 1973 para 60,5 % em 2006 – um crescimento de 33 %! Por outro lado, o uso de energia elétrica no setor de transportes, que já era bem reduzido em 1973, caiu de 2,4 % para 1,7 % (uma diminuição de 29 %, considerando os segmentos do setor em análise). Estes números, em especial os baixos níveis de consumo de energia elétrica, mostram que o potencial brasileiro de energia reservado ao transporte elétrico é verdadeiramente subutilizado, o que também é o caso de muitas de suas outras aplicações.

Além disso, o Brasil tem um dos maiores potenciais de energia elétrica do mundo, e 70,6 % da eletricidade gerada no país é hidráulica, o que significa que vem de uma fonte primária renovável, como mostra a Tabela 3, onde a capacidade de oferta de geração é listada de acordo para a fonte primária utilizada.



Tabela 3 – Geração total de energia elétrica

<b>Geração de Energia</b>	<b>Porcentagem</b>
Hidráulica	70,6 %
Gás Natural	11,3 %
Biomassa	7,6 %
Derivados de Petróleo	4,4 %
Carvão Mineral e Derivados	2,6 %
Nuclear	2,4 %
Eólica	1,1 %
<b>Total</b>	<b>100 %</b>

Fonte: DOMINGUES, 2013.

## **Eficiência Energética e Meio Ambiente**

### **Emissões Atmosféricas do Setor de Transportes**

Um importante elemento agravante das alterações climáticas é o aumento da concentração de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) na atmosfera. Para reduzir as emissões deste tipo, é necessário rever o modelo atual do setor de transportes, que no Brasil é baseado particularmente em combustíveis fósseis. Este setor é a segunda maior fonte de emissões de CO<sub>2</sub> após o setor industrial, conforme mostrado no item anterior.

As emissões originárias dos meios de transporte estão aumentando nas áreas urbanas. O censo de 2010 mostrou que 84 % da população brasileira vive em cidades. No Rio de Janeiro, por exemplo, em 1998, de acordo com um estudo do Instituto Pereira Passos, uma autarquia municipal, a porcentagem de emissões do setor dos transportes atingiu 61 %. Atualmente, este número ultrapassa 80 %, se forem incluídas as motocicletas, que quase nunca têm conversores catalíticos.

Tabela 4 – Emissão de CO<sub>2</sub> pelo setor de transportes no Brasil

<b>Tipo</b>	<b>CO<sub>2</sub> (t/ano)</b>	<b>Porcentagem</b>
Rodoviário	138.768.000	90,4 %
Aéreo	7.999.000	5,5 %
Marítimo	4.279.000	2,9 %
Ferrovário	1.803.000	1,2 %
<b>Total</b>	<b>146.849.000</b>	<b>100 %</b>

Fonte: DOMINGUES, 2013.

A criação de incentivos para veículos elétricos reduzirá os níveis de emissões do setor de transportes. Dois fatos sustentam este argumento: 1) o mais alto nível de poluição corresponde aos veículos rodoviários; 2) as emissões de CO<sub>2</sub> dos veículos totalizam 35 %, conforme mostrado nas Tabelas 4 e 5, respectivamente.

Tabela 5 – Emissão de CO<sub>2</sub> por veículo no Brasil

<b>Tipo de Veículo</b>	<b>Porcentagem</b>
Veículos Movidos a Gás Natural	3,0 %
Caminhões de Grande Porte	30,0 %
Caminhões de Médio Porte	4,0 %
Caminhões de Pequeno Porte	1,0 %
Ônibus Rodoviários	3,0 %
Ônibus Urbanos	14,0 %
Veículos Leves a Diesel	3,0 %
Automóveis Comerciais Leves de Ciclo Otto	4,0 %
Motocicletas	3,0 %
Automóveis	35,0 %
<b>Total</b>	<b>100 %</b>

Fonte: DOMINGUES, 2013.

As Tabelas 4 e 5 mostram a necessidade de um esforço para mudar a estrutura do setor rodoviário brasileiro, nomeadamente via introdução de veículos elétricos. De acordo com testes realizados pela Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ), em um projeto de Pesquisa & Desenvolvimento aprovado pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), veículos elétricos movidos exclusivamente à bateria utilizam 1/3 da energia necessária a um veículo de combustão interna convencional. É de se notar ainda que, além do dióxido de carbono, que impacta profundamente na questão climática, há outras substâncias poluentes que são muito prejudiciais para a saúde humana, tais como o monóxido de carbono, os óxidos de nitrogênio, em geral, e materiais particulados (MP), além de compostos orgânicos voláteis, incluindo aldeídos. Todas estas substâncias estão presentes em maior ou menor grau nas emissões de veículos convencionais, incluindo os bicompostíveis (*flex fuel cars*).

### **Obstáculos à Introdução de Veículos Elétricos**

Em meados de 2009 o Governo Brasileiro se mostrava inclinado a promover políticas fiscais favoráveis aos veículos elétricos. Não obstante, até recentemente, as promessas da

época não se traduziram em realidade, já que em 2010 uma importante oportunidade foi perdida, mais precisamente na semana que antecedeu a realização do evento internacional sobre mobilidade, o Michelin Challenge Bibendum 2010, no Rio de Janeiro. Nessa ocasião, havia uma expectativa dos participantes do citado evento quanto ao possível anúncio pelo Governo com respeito às esperadas medidas relacionadas à introdução de políticas públicas no Brasil para os VEs. Depois, as reportagens publicadas na mídia que se sucederam refletiram uma grande frustração por não se compreender que o VE é um fator fundamental de desenvolvimento tecnológico, econômico e social para o país.

Entretanto, ainda há tempo para se discutir no país a produção de VEs, os quais, movidos em parte ou totalmente por eletricidade, híbridos e exclusivamente a baterias, respectivamente, são mais eficientes e, portanto, geram menos emissões atmosféricas. Assim apresentam um enorme potencial de reduzir a dependência de combustíveis do modal rodoviário de transporte cujo consumo de energia é apenas suplantado pelo da indústria, conforme consta na recente edição do Balanço Energético Nacional (BEN) publicado em 2014 [MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2014]. Isto se explica pela histórica concentração do modal rodoviário que utiliza os processos de combustão interna para obtenção da força motriz de tração. Devido a sua pouca eficiência verifica-se atualmente a possibilidade efetiva do uso da tração elétrica tendo em vista os avanços tecnológicos da eletrônica, dos conversores eletromecânicos de energia e das fontes eletroquímicas. Todavia, apesar da excelente matriz energética brasileira oferecer condições ímpares no mundo para a expansão dos VEs, há barreiras institucionais que precisam ser removidas. VEs constituem uma forma simples de obter excedentes de combustíveis que poderão ser exportados ao invés de meramente queimados no Brasil.

A proposta alvitra a imposição de tributação mais elevada de acordo com o maior grau de consumo energético (MJ/km) por carros, bem como de emissão de dióxido de carbono não renovável (gCO<sub>2</sub>/km), com base num ciclo de teste veicular típico. Não se percebem medidas de governo de estímulo aos VEs, sendo certo que a legislação tributária vigente parece só enxergar veículos à combustão interna, tratando os VEs como “Outros”. É surpreendente esta postura quando as próprias montadoras atuantes no Brasil produzem e comercializam, nos países correspondentes às suas matrizes, veículos elétricos, tanto, exclusivamente à bateria, como os táxis da Nissan Leaf que estão rodando em teste na cidade do Rio de Janeiro e de São Paulo, como os híbridos elétricos, que associam motores à combustão a motores elétricos, visando garantir uma autonomia maior que os veículos convencionais. Desta forma, é preciso que se considere o fato de que, seja etanol, gás natural, gasolina, diesel ou eletricidade, o que

move o veículo é a energia armazenada nos tanques de combustível ou nas baterias. Sabe-se que esta energia pode ser expressa por uma unidade comum, Joule (J), e seus múltiplos, como garante a Primeira Lei da Termodinâmica. Assim, o tratamento em termos de energia por km (MJ/km), por exemplo, não privilegia os veículos tradicionais à combustão interna, que obviamente só funcionam a partir de combustíveis. Ao contrário, os VEs apresentam a flexibilidade de utilização de outras fontes primárias das quais se extrai a eletricidade: energia solar, energia eólica, energia hidráulica, biogás do lixo, cana-de-açúcar e, evidentemente, do petróleo e do gás natural. Esta diversidade permite que se aproveite melhor a abundância dos recursos renováveis e não renováveis de energia do Brasil para suprir o transporte rodoviário de forma mais eletrizada e, portanto, mais eficiente com menor emissão, a partir da penetração gradativa dos VEs, conforme o próprio documento aprovado pelo Governo Brasileiro na Convenção Rio + 20 (*The future we want*). De fato, esse texto chama a atenção a este respeito quando ainda na página 24 que *We also recognize the importance of promoting incentives in favor of, and removing disincentives to, energy efficiency and the diversification of the energy mix, including promoting research and development in all countries*. Acrescenta-se que de acordo com diversos estudos divulgados nos seminários realizados pela Associação Brasileira do Veículo Elétrico (ABVE) não há impacto sobre o planejamento energético de eletricidade do país nas próximas décadas.

Novas infraestruturas são necessárias para realizar pesquisas e testes de laboratório pelo Departamento Nacional de Trânsito (DENATRAN) com vistas a desenvolver pesquisas a fim de aprimorar essas medidas para os novos sistemas de propulsão veicular visando uma tributação adequada. A tecnologia dos VEs está associada a benefícios econômicos relacionados ao desenvolvimento de redes de distribuição, de geração e das chamadas *smart grids* (redes inteligentes de energia). VEs neste caso podem, por exemplo, atuar como *no-breaks* de uma residência inteira e até mesmo intercambiar energia com a empresa concessionária respectiva. O fato de os VEs poderem utilizar recarga noturna já pode, com grande vantagem, ser adotado pelas frotas da indústria, do comércio e do setor público que contem com as tarifas reduzidas, já que nesse horário a recarga torna-se extremamente atrativa, algo impossível a qualquer veículo à combustão interna, já que não há diferença do preço do combustível em relação ao horário do reabastecimento. Lamentavelmente estas oportunidades são na prática negadas à sociedade brasileira tendo em vista não haver uma atualização tecnológica dos dispositivos normativos existentes sobre esta matéria.

É importante destacar que a eletricidade neste momento está transpondo a sua última fronteira de aplicação. Uma das primeiras foi a iluminação, com advento das lâmpadas

incandescentes até se chegar às lâmpadas de *led* supereconômicas e, em breve, bem mais acessíveis. Na indústria, paulatinamente, as máquinas a vapor foram substituídas por motores elétricos. O advento da eletrônica possibilitou controlá-los de forma cada vez mais eficiente chegando-se, após a motorização elétrica da indústria, à motorização elétrica do transporte, inclusive rodoviário, nos dias atuais. Esta percepção já havia se manifestado no início do século passado, entretanto naquela época não existia a eletrônica nem tampouco fontes eletroquímicas avançadas. A mudança atual de paradigma se apresenta inexorável e irreversível e desta maneira não se pode abdicar dela em países como o Brasil, que apresenta o quarto maior mercado automotivo do mundo, com tendência nos próximos anos de ser o segundo maior. Isto explica a invasão de novas montadoras que se instalam no Brasil, mas não explica que, a despeito deste trunfo, não se estimule a introdução dos VEs no Brasil. Pelo contrário, apenas se estimula o consumo com medidas temporárias de redução de impostos sobre veículos pouco eficientes e que poluem. As mesmas renúncias fiscais decorrentes destas iniciativas pontuais podem ser um bom começo para um plano de longo prazo visando à introdução da tecnologia veicular elétrica no Brasil.

### **Carga Tributária Sobre Veículos Elétricos no Brasil**

Segundo [DOMINGUES, 2013; DOMINGUES, 2014], além de uma carga tributária geral reconhecida de mais de 35 %, não acompanhada por correspondentes serviços públicos eficientes, no Brasil os VEs sofrem com um custo fiscal que cria um gargalo industrial: tributados a 25 % pelo IPI (IVA federal) – a mesma alíquota aplicada aos veículos movidos com motor a combustão, mais poluentes (alíquota de 35 % aplicável às motocicletas elétricas) – eles também estão sujeitos ao ICMS (IVA estadual), entre 18 % e 19 %, além de serem tributados em 11,6 % por contribuições sociais federais sobre o faturamento bruto. Há ainda um imposto anual estadual sobre veículos automotores de até 4 %. Esses impostos federais e estaduais têm uma base de cálculo comum: o valor de mercado do veículo. Tamaña carga fiscal torna praticamente impossível a produção em larga escala de VEs e seu comércio, impedindo a sua utilização no combate à poluição do ar nas grandes cidades.

Além disso, há impostos municipais sobre imóveis (por exemplo, um imposto anual de 2,8 % sobre o valor de mercado de imóveis urbanos no Rio de Janeiro) e sobre a prestação de serviços (geralmente entre 2 % e 5 % do preço do serviço).

Não há ainda qualquer incentivo em matéria de imposto de renda ou subsídio financeiro previsto em lei para os fabricantes e consumidores de VEs, diversamente do que ocorre em países europeus.

A UERJ desenvolveu uma parceria pioneira entre os cursos de Direito e Engenharia, levando a propostas legislativas do Núcleo de Estudos sobre Finanças Públicas, Tributação e Desenvolvimento (NEFIT-UERJ) de incentivo a políticas em benefício da produção doméstica e consumo de veículos elétricos, que abrangem de impostos federais a impostos estaduais e municipais. Atualmente o NEFIT interage com o Laboratório de Políticas Públicas e Justiça Fiscal – LAPPJUS da UERJ.

Em concordância as referidas propostas legislativas, o Grupo de Estudos de Veículos Elétricos (GRUVE) da UERJ acredita que a Federação Brasileira precisa adotar políticas públicas federais, estaduais e municipais visando à promoção do desenvolvimento sustentável, através da criação de incentivos fiscais na legislação tributária do país, de modo a incentivar a pesquisa e desenvolvimento de novas tecnologias veiculares, especialmente para veículos elétricos.

## **Estado da Arte**

Há décadas engenheiros e cientistas em geral vêm estudando novas tecnologias para diversificar a matriz energética do setor de transportes, priorizando energias renováveis e limpas devido aos problemas ambientais como aquecimento global, efeito estufa e, principalmente, poluição, que vem crescendo nos últimos anos e hoje se encontra em níveis alarmantes em muitos países.

As preocupações com a poluição do ar antecedem a década de 90. Uma série de eventos em prol da melhoria das condições atmosféricas iniciou-se em Outubro de 1988 com a *Toronto Conference on the Changing Atmosphere*, no Canadá, seguida pela *IPCC's First Assessment Report*, em Sundsvall, na Suécia, em Agosto de 1990, e que culminou com a *Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança Climática*, na ECO-92, no Rio de Janeiro, no Brasil, em Junho de 1992.

Discutido e negociado em Quioto no Japão em 1997, o Protocolo de Quioto foi aberto para assinaturas em 11 de Dezembro de 1997 e ratificado em 15 de março de 1999. Sendo que para este entrar em vigor precisou que 55 países, que juntos produzem 55% das emissões, o

ratificassem, assim entrou em vigor em 16 de fevereiro de 2005, depois que a Rússia o ratificou em Novembro de 2004. Por ele se propõe um calendário pelo qual os países-membro (principalmente os desenvolvidos) têm a obrigação de reduzir a emissão de gases que agravam efeito estufa em, pelo menos, 5,2 % em relação aos níveis de 1990 no período entre 2008 e 2012, também chamado de primeiro período de compromisso (para muitos países, como os membros da União Europeia, isso corresponde a 15 % abaixo das emissões esperadas para 2008).

Uma das ações básicas estimulada pelo Protocolo de Quioto é “reformular os setores de energia e transportes”, e a maneira mais eficiente de fazê-lo é substituir gradativamente os veículos à combustão interna pelos veículos elétricos à bateria. Para tanto, muito se tem avançado em estudos e pesquisas para aperfeiçoamento do sistema de propulsão veicular elétrica, bem como seu suporte logístico e energético.

Quanto ao suporte energético, uma linha de pesquisa que tem gerado muitos artigos importantes para a penetração dos VEs ao longo dos anos é a relacionada ao reabastecimento destes veículos e seus efeitos nos transformadores da rede elétrica de distribuição. Tal abordagem também é o principal tema desta dissertação.

Seguindo esta linha de pesquisa, em 1982, J. A. Orr, na ocasião membro da *Worcester Polytechnic Institute*, em Massachusetts, no intuito de avaliar os efeitos das componentes harmônicas de corrente na rede elétrica durante a recarga de veículos elétricos, utiliza a função densidade de probabilidade lognormal para tratar a variável referente ao estado de carga inicial das baterias dos veículos e a função distribuição gaussiana para o instante de conexão destes à rede elétrica. Para tanto, números aleatórios são gerados numa simulação Monte Carlo para criar os estados de carga iniciais e os instantes de conexão, entretanto, a lognormal do estado de carga é truncada pela autonomia do veículo. A escolha da lognormal para o estado de carga inicial e da gaussiana para o instante de conexão foi feita baseada no relatório da *Electric Power Research Institute* (EPRI), de 1978. É importante ressaltar que naquela época o número de veículos elétricos nas ruas para realizar as pesquisas que geraram tal relatório era muito pequeno. Ele afirma que não será possível produzir uma distribuição de probabilidade exata do estado de carga e que a distribuição do instante de conexão será uma função dos padrões de uso do VE e de práticas de controle de tarifa de energia ao longo do dia. Orr acredita que as distribuições usadas em seu artigo [Orr, 1982] são estimativas razoáveis e resultam em valores representativos.

Em 1997, P. T. Staats, na época estudante na *University of Texas at Austin*, utilizou as mesmas funções de densidade de probabilidade adotadas por Orr tanto para o instante de

conexão quanto para o estado de carga, em seu estudo sobre os efeitos das correntes harmônicas durante a recarga de veículos elétricos. Porém, enquanto J. A. Orr, usando uma simulação Monte Carlo, analisou as correntes harmônicas associadas a um grupo de carregadores de VEs conectados a um barramento comum, P. T. Staats apresenta uma técnica de solução analítica generalizada para prever as correntes harmônicas produzidas por um grupo de carregadores de VEs [STAATS, 1997b].

No mesmo ano de 1997, três meses depois de publicar o artigo anterior, P. T. Staats publicou um novo trabalho onde ele avalia a quantidade de perda de capacidade do transformador mantendo constante a perda de vida diária do mesmo, com e sem a recarga de veículos elétricos. O artigo [STAATS, 1997a] indica que o efeito da recarga de VEs na perda de capacidade do transformador depende do instante de conexão e do tempo de recarga. Como é esperado que os VEs sejam conectados fora do horário da ponta, eles têm um efeito menos pronunciado na perda de capacidade do transformador. Esses efeitos são exacerbados pelo fato de que a relação exponencial entre a temperatura de isolamento e a deterioração permite aquecimento adicional a baixas temperaturas, relativamente a longo prazo, sem efeito significativo na expectativa de vida do transformador. Os efeitos das componentes harmônicas da corrente fundamental também provocam pouco efeito na perda de capacidade do transformador, apenas 3 % de diferença para 100 % de penetração de VEs.

Uma nova abordagem do perfil do instante de conexão dos VEs à rede elétrica foi apresentada em 2000 por L. A. Pecorelli Peres da Universidade do Estado do Rio de Janeiro em seu artigo [PECORELLI PERES, 2000b]. Neste trabalho é usada função de densidade normal para distribuir o instante de conexão de 10000 VEs à curva de demanda diária de um transformador de baixa tensão, onde a média da normal foi posicionada às 22:00, assumindo uma maior concentração de conexão de VEs à rede no período noturno, conforme vem sendo previsto pela maioria dos estudiosos no assunto. Neste artigo é apresentado graficamente o comportamento da curva de recarga típica de um veículo elétrico, composta basicamente por um longo período de potência praticamente constante seguido de um brusco decaimento similar a uma rampa. Pecorelli mostrou também os benefícios ambientais da substituição dos VCIs por VEs com respeito à redução de emissão nos centros urbanos que, além do incômodo, contribui seriamente para o desenvolvimento de doenças nos olhos e nos pulmões.

Em 2002, L. A. Pecorelli Peres publicou um artigo que descreve a oferta de recarga de veículos elétricos não rodoviários (VENR) que atuam em áreas urbanas restritas no Brasil, como shoppings, aeroportos, hotéis, parques, hospitais, entre outras, cujas vendas vêm crescendo em torno de 30 % ao ano e estima-se que em algumas regiões já existam cerca de



mil em serviço [PECORELLI PERES, 2002]. Essa rápida penetração destes veículos no mercado impõe a introdução de novas metodologias e procedimentos para estudos de planejamento a fim de avaliar seus possíveis efeitos sobre a demanda de carga e energia em uma típica área de sistema de distribuição de energia. Em sua simulação de recarga foi utilizada uma distribuição uniforme para o instante de conexão dos VENRs, sugerido em [RAHMAN, 1993] como sendo uma representação melhor do que uma abordagem determinística com todos os veículos sendo conectados ao mesmo tempo. Adicionalmente, são calculadas a economia de combustível e as emissões evitadas se VENRs fossem utilizados em vez dos VCIs. Segundo Pecorelli, o gasto de energia para recarga de VENR é pelo menos 50 % mais barato do que para reabastecimento de um veículo à combustão interna (VCI) similar percorrendo previamente a mesma distância, sem, entretanto, piorar as condições de qualidade do ar. Este artigo tem como base um trabalho anteriormente publicado por ele em [PECORELLI PERES, 1999].

Em seu trabalho publicado em 2009 [PECORELLI PERES, 2009], Pecorelli menciona a importante criação ABVE em Agosto de 2006. Segundo ele a penetração gradual de VEs é uma consequência da mudança de paradigma com relação ao sistema de propulsão veicular devido aos danos causados pela poluição do ar com as emissões atmosféricas do setor de transportes que é, em sua maioria, movido a combustíveis fósseis. Esta penetração de VEs necessita de pesquisas e estudos, especialmente quanto ao suprimento de energia. Este cenário fornece iniciativas às concessionárias de energia com respeito às responsabilidades sociais e ambientais. Além disso, o desenvolvimento de novos negócios para esse mercado emergente resultará em receitas adicionais devido à recarga de baterias. Estes argumentos estimularam a Ampla Energia e Serviços de Eletricidade S.A. a estabelecer, em Setembro de 2006, a parceria com a UERJ, através do GRUVE, para conduzir o primeiro projeto de pesquisa sobre veículos elétricos rodoviários no Brasil aprovado pelo programa de P&D da ANEEL. O objetivo do projeto, base do citado artigo, foi desenvolver uma metodologia de teste para avaliação do desempenho de veículos elétricos à bateria (VEBs) a fim de satisfazer as condições para sua utilização tanto pelo serviço de transporte interno da companhia como por seus clientes que se tornarão usuários deste tipo de automóveis. A pesquisa estabeleceu procedimentos para características energéticas, ambientais e parâmetros econômicos a fim de demonstrar os benefícios adicionais desta tecnologia para a empresa. Além disso, foi realizado estudos para a identificação de possíveis barreiras culturais, tecnológicas e institucionais que impeçam o desenvolvimento da tecnologia veicular elétrica no Brasil.

Constatou-se, neste artigo, a necessidade urgente de políticas públicas no Brasil devido às altas taxas impostas à produção e comercialização de VEs.

### **Contexto do Trabalho e Objetivo**

No âmbito do projeto de P&D/ANEEL “Desenvolvimento de Rede de Abastecimento de Veículos Elétricos para a Cidade Inteligente Búzios“, foi estabelecida uma metodologia de ensaios e experimentos com os quais se obtém amostras da recarga de veículos elétricos. Além disto, foram desenvolvidos painéis de recarga com medição inteligente, tanto para carros quanto para bicicletas, que se encontram atualmente instalados no Centro de Monitoramento e Pesquisa (CMP) em Búzios. Estes painéis são essenciais tanto para coletas de dados como também para demonstrações aos visitantes do CMP.

Em continuidade a esta pesquisa, o presente trabalho tem como objetivos apresentar uma nova e pioneira metodologia de análise dos efeitos decorrentes da recarga de veículos elétricos rodoviários à bateria em transformadores de distribuição, propiciando a gestão desta demanda no ambiente de redes inteligentes de energia e atender a necessidade do planejamento a médios e longo prazo das redes de distribuição, quanto à demanda e energia requerida durante a recarga de VEs. Além de destacar os benefícios ambientais e energéticos da penetração dos veículos elétricos no modal rodoviário, expostos nos Apêndices A e B, respectivamente. Esta metodologia utiliza para isto amostras de ensaios de recarga de VEs e as características técnicas dos seus respectivos bancos de bateria. Com isto, é possível modelar curvas de recarga, correspondentes às diversas distâncias percorridas pelos VEs, e analisar seus efeitos na curva de demanda do transformador em simulações de reabastecimento.

Todo o desenvolvimento para a referida análise foi realizado mediante rotinas em ambiente computacional MATLAB (<http://www.mathworks.com/products/matlab/>), versão 7.12 – R2011a, criadas durante a pesquisa, utilizando, para distribuição das variáveis aleatórias distância previamente percorrida e horário de conexão à rede elétrica, a função densidade de probabilidade lognormal, cujo gerador de números aleatórios é a função *lognrnd* – *Lognormal random numbers*.

## **A Eletrificação do Transporte Rodoviário**

O conceito de veículo elétrico remota do século passado e seus benefícios são bem conhecidos. O fato desses veículos ainda não fazerem parte do setor de transporte não é culpa das montadoras nem dos consumidores.

Os consumidores sabem que os VEs impactam positivamente na economia, segundo [PECORELLI PERES, 2011; PECORELLI PERES, 2012] a substituição de um VCI por um VE faz com que se reduza a cerca de um terço as despesas anuais do usuário com reabastecimento dos veículos. Além disso, os veículos elétricos beneficiam o meio ambiente e são contemplados com as mais recentes tecnologias. Todo o suporte necessário para uma penetração gradativa e significativa do VE já está no mercado.

O que está faltando é uma combinação de tecnologia, desejo e marketing para fazer dos VEs um item indispensável. Juntos, engenheiros e políticos podem tornar isso uma realidade, para tanto eles precisam não apenas usar seu intelecto, mas também conhecer o desejo do consumidor.

É importante comentar que, de acordo com [SERRA, 2012], que aborda as questões tecnológicas e políticas do veículo elétrico com ênfase no seu desenvolvimento comercial, a despeito dos desafios desta mudança que visa a eletrificação do transporte rodoviário, há sinais claros e definidos quanto à sua irreversibilidade.

### **Análise Histórica**

Para avançar, por vezes faz-se necessário reavaliar fracassos e realizações passadas. As gerações passadas de projetos de VEs prenderam a atenção do público. Inovação e evolução são os principais pilares do desenvolvimento de VEs. A evolução do VE pode ser rastreada desde antes de 1830. Robert Anderson da Escócia construiu o primeiro protótipo de uma carruagem movida à eletricidade e durante o mesmo período, o engenheiro alemão Andreas Flocken construiu o primeiro carro elétrico de quatro rodas. Pope Manufacturing Co., de Hartford, Connecticut, o primeiro fabricante de VE em larga escala na América do Norte, fez carros elétricos para a frota de táxi da cidade de Nova York. Estas inovações impulsionaram a tecnologia de VE numa indústria em expansão nos Estados Unidos que, em

1900, abrangia 28 % do mercado de veículos rodoviários. Este momento foi seriamente afetado pela introdução do carro Ford Modelo T movido a petróleo. O mercado de VE despencou para perto da extinção por causa da predominância de motores de combustão interna (MCI) e da disponibilidade de petróleo barato.

Nos últimos anos tem-se visto um ressurgimento do interesse por VEs devido tanto ao aumento dos preços do petróleo quanto aos programas de pesquisa e desenvolvimento que têm melhorado significativamente a tecnologia. As iniciativas do governo, tais como o programa veículos de emissão zero na Califórnia, tornaram a tecnologia mais atraente para as montadoras, também energizando o mercado de VE. A Toyota foi a primeira montadora a lançar um veículo híbrido comercial, vendendo 18000 unidades em 1997. Desde então, os preços do petróleo têm aumentado de forma constante, atingindo um máximo de mais de US\$ 145 por barril. Com isso, as principais montadoras têm desenvolvido e comercializado uma nova geração de veículos de energia eficiente, o Veículo Elétrico Híbrido Plug-in (VEH Plug-in) e o Veículo Elétrico à Bateria (VEB).

### **Presente e Perspectivas Futuras**

Hoje, o VCI é uma necessidade moderna em que a sociedade se baseia. Entretanto, o grande número de automóveis em uso ao redor do mundo causou e continua causando sérios problemas de saúde e ambientais. A poluição do ar, o aquecimento global e o rápido esgotamento das reservas de petróleo da Terra são problemas de interesse primordial.

De acordo com Navigant Research, “O preço médio dos combustíveis para veículos convencionais provavelmente vai continuar a subir durante o resto da década, conduzindo a demanda para os veículos eletrificados (VEH, VEH Plug-in, VEB)”. Até agora, esta previsão está sendo cumprida. Essa informação é corroborada por descobertas da Pike Research a cerca do aumento das vendas de VE e da sua penetração no mercado ao redor do mundo.

Em 2012, o Japão liderou a venda de carros puramente elétricos com a quantia de 28 % do mercado de vendas global, seguido pelos Estados Unidos com 26 %, China com 16 %, França com 11 % e Noruega com 7 %. A venda de híbridos plug-ins em 2012 foi liderada pelos Estados Unidos com 70 % das vendas globais, seguido pelo Japão com 12 % e a Holanda com 8 %. De acordo com um relatório recente da Navigant Reserach, um total de 21,9 milhões de VEs serão vendidos em todo o mundo durante o período de 2012 a 2020.

## Compromissos Políticos à Longo Prazo

A significativa redução no uso de combustível fóssil e emissões de CO<sub>2</sub> é uma característica bem conhecida e atrativa dos VEs que permitiu sua penetração gradativa no mercado. O público e a indústria entendem a importância de reduzir as emissões de carbono. Eles sabem que o setor de transporte, como um todo, tem uma emissão de carbono significativa, e somente o governo tem o poder para regular as emissões através da legislação. Nos Estados Unidos, por exemplo, a regulamentação *Corporate Average Fuel Economy* (CAFE) obriga, ou “conduz”, os fabricantes automotivos a melhorar a autonomia dos motores de seus veículos todo ano. Ultimamente, isso estimulou os fabricantes a introduzir mais VEs em sua linha de produtos, porque atender as normas com os VCIs tornar-se-á cada vez mais difícil. As normas CAFE foram documentadas em *2017-2025 Model Year Light-Duty Vehicle GHG Emissions and CAFE Standards*.

Segundo uma previsão de curto prazo do mercado de VE em porcentagem de cada empresa individual, está previsto a Toyota liderar o mercado com 38,5 %, seguido da Ford, Nissan, Honda e General Motors. É estimado que as vendas de VEs começarão a crescer rapidamente depois de 2015 e chegar a um combinado de 7 milhões por ano em 2020 e 100 milhões em 2050.

A Agência Internacional de Energia apresenta um roteiro positivo e ambicioso para alcançar a adoção amplamente difundida do uso mundial de VEs e VEHs em 2050. O roteiro tem como alvo uma redução de 30 % em níveis de CO<sub>2</sub> global em 2050 em relação a 2005. A redução é para ser implementada através de melhorias da eficiência e do transporte eletrificado, com uma cota de VEs de pelo menos 50 % das vendas globais de veículos leves. Para atingir este objetivo, políticas públicas são indispensáveis para garantir que o custo inicial seja tanto acessível quanto possível e que uma infraestrutura de recarga adequada exista. Além disso, colaborações entre companhias de setores públicos e privados precisam ser estabelecidas e fortalecidas através de programas de pesquisas, normas e desenvolvimento de infraestrutura.

## Máquinas Elétricas

As máquinas elétricas têm provado suas habilidades para fornecer potência mecânica de eficiência relativamente alta quando comparadas aos MCIs ao longo das últimas décadas. Esta, juntamente com suas habilidades de atenuar o consumo de combustíveis e as emissões de gases de efeito estufa, é uma razão substancial para substituir MCIs por máquinas elétricas. Isso criou uma demanda para uma nova geração de máquinas elétricas que atenda às necessidades específicas do transporte eletrificado. Todos os VEs têm pelo menos um e alguns têm múltiplos motores elétricos dependendo do seu sistema de propulsão. A produção anual de motores elétricos para VEs deverá chegar a milhões nesta década, baseado em previsões de analistas que acompanham os planos de produção de veículos híbridos e elétricos. A Navigant Research prevê um crescimento do mercado global de motores de propulsão elétrica em veículos leves de pouco menos de US\$ 1 bilhão em receita anual em 2013 para mais de US\$ 2,8 bilhões em 2020 [KAR, 2013].

O motor de tração é a chave para a sinergia da propulsão elétrica. Selecionar um motor existente adequado é um desafio para os projetistas. É importante reconhecer que a escolha do motor não pode ser feita sem considerações cuidadosas de integração dos controladores e da eletrônica de potência associada. Alguns fabricantes decidiram enfrentar essa questão projetando, desenvolvendo e produzindo seus motores de tração internamente, ao invés de comprar máquinas da prateleira de fornecedores especializados. Os motores de prateleiras, não importa o quão extensivamente ele seja adaptado para uma aplicação específica, pode comprometer a eficiência do sistema de propulsão.

A seleção apropriada do tipo de máquinas elétricas é baseada em características chave tais como a fonte de energia do veículo, espaço e dinâmica veicular, eficiência, confiabilidade, custo e requisitos principais de funcionamento da máquina. Os requisitos principais de funcionamento do motor de tração incluem uma ampla faixa de velocidades, resposta ao impulso, alta eficiência sobre um elevado torque e velocidade, alto torque a baixas velocidades, tolerância a falhas e alta densidade de energia. Dentre os principais fabricantes automotivos, não há um consenso geral para o tipo de máquina elétrica mais adequada para veículos, mas as máquinas de indução (MI) e de ímã permanente (MIP) são os dois tipos comumente usados em VEs e espera-se que estas continuem dominando o mercado.

Essas máquinas fundamentalmente mudam na arquitetura de seu rotor. O rotor da MI contém barras condutoras que cortam o campo do estator e desenvolvem uma tensão que

conduz uma corrente e produz o campo secundário. Os rotores das MIPs usam ímãs para gerar exclusivamente o campo magnético do rotor, sem a necessidade de corrente de excitação ou quaisquer perdas associadas com ela. As MIPs são preferidas por sua eficiência, densidade de torque e maior capacidade de dissipação de calor que suas homólogas máquinas de indução. Motores de ímã permanente são amplamente usados em VEs atualmente, incluindo Ford Focus, Toyota Prius, Chevrolet Volt e Nissan Leaf devido ao seu desempenho superior sobre as máquinas de indução. Remy é um fabricante de motores elétricos de ímã permanente usados por híbridos da GM, da BMW e da Mercedes, bem como uma crescente lista de veículos comerciais. Áreas de pesquisa em máquinas de ímã permanente incluem estudos dos efeitos, em harmônicos, das configurações do rotor e do estator, além das causas e atenuações da desmagnetização.

As vantagens das MIPs são compensadas pelo aumento do preço e pelas rupturas de abastecimento de ímãs devido às questões geopolíticas. Este desafio inspirou empresas como a TESLA e a REMY a desenvolver a nova geração de máquinas de indução para veículos que será mais leve e mais eficiente que as de ímã permanente. Os motores de indução convencional usam rotores de alumínio. Entretanto, a condutividade elétrica do cobre é 60 % maior que a do alumínio, fazendo desta uma substituição mais atraente. A utilização do cobre pode também reduzir as temperaturas de operação dos motores para a faixa de 5 a 32 °C. Estes dados sugerem que o tempo de vida dos motores usando rotores de cobre pode ser estendido em 50 % ou mais. Um exemplo do uso de máquinas de indução de rotor de cobre está na última geração do veículo elétrico híbrido (VEH) pesado do exército dos Estados Unidos alimentado por quatro máquinas de indução de 520 V, 140 HP com rotor de cobre fundido.

O motor de relutância comutada (MRC) é outro candidato a motor de tração. Estes vêm sendo aplicado em veículos pesados e pesquisas estão em progresso para implementá-los em veículos leves. O MRC é uma máquina de polos duplamente salientes sem enrolamento ou ímã no rotor. Possui uma estrutura simples e robusta com capacidade de tolerância a falhas, capacidade de operação em alta velocidade, alta densidade de energia e custo de fabricação relativamente baixo. Apesar dessas vantagens, alguns desafios se fazem presente na utilização dos MRCs. Por exemplo, ondulação de torque e ruídos acústicos precisam ser abordados através de melhorias fundamentais de design para desenvolver um sistema de propulsão elétrica viável baseado no MRC.

## Controle de Máquinas Elétricas

Independente do tipo de máquina selecionada, para alcançar o funcionamento desejado, uma unidade de controle adequada é necessária. A unidade de controle consiste de um conversor bidirecional e seu controlador. No nível da máquina, durante o funcionamento, o objetivo é prover aos terminais tensão apropriada para fazer os comandos de torque que a unidade de controle está impondo por meio da ação do pedal do acelerador. Adicionalmente, alguns veículos usam frenagem regenerativa, a qual usa a máquina elétrica como um gerador para converter a energia produzida pela ação do retardo do veículo e usá-la para carregar o banco de baterias. Com veículos híbridos, um controlador é necessário para determinar a potência que flui através do sistema uma vez que existem múltiplas fontes de energia, a bateria e o MCI, que trabalham de forma diferente durante vários modos.

Para controlar qualquer máquina, um relacionamento deve ser estabelecido entre a excitação de entrada e o torque resultante. O torque numa máquina elétrica surge da interação dos campos magnéticos do estator e do rotor, e a geração desses campos depende de um acoplamento e de uma complicada interação da corrente e do fluxo enlaçado do enrolamento interno. O controle de motor elétrico mais comumente adotado em VEs é a técnica de controle vetorial que é capaz de separar matematicamente a componente da corrente diretamente responsável pela produção do torque. Isto é feito projetando todo o valor trifásico ao longo de dois eixos: o eixo direto  $d$ , que está em linha com o campo, e o eixo em quadratura  $q$ , que é perpendicular a ele. Para encontrar esses eixos, é necessário determinar a posição do rotor em tempo real.

Em um motor de ímã permanente, quando este trabalha abaixo da velocidade base, o controlador calcula a referência  $d$  e a corrente do eixo  $q$  usando uma técnica de máximo torque por ampère para garantir a eficiência e a produção de torque do motor. Acima da velocidade base, um método de enfraquecimento do campo é usado para estimar a corrente de referência e assegurar que o limite de potência não seja excedido. A referência  $d$  e a tensão do eixo  $q$  são gerados levando em consideração os termos de acoplamento cruzado, que surge da interação do acoplamento elétrico mencionado anteriormente, e então voltam a ser convertidos para valores trifásicos. A modulação por largura de pulso, *Pulse Width Modulation* (PWM), é usada para gerar um sinal de *gate* para as chaves eletrônicas criarem a forma de onda da tensão requerida [MOHAN, 1995].



Conhecer os requisitos avançados de dinâmicas rápidas, vetor de campo orientado ou controle de torque direto são também soluções para máquinas de indução. Com controle orientado de fluxo do rotor em um motor de indução de gaiola de esquilo, a porção instável da característica natural torque-velocidade desaparece, e por isso, não existe chance de instabilidade devido a certos tipos de torques de carga. A vantagem adicional é o fato de que a capacidade de produção de máximo torque da máquina é ditada apenas pelas considerações térmicas. A resposta do torque eletromagnético torna-se tão rápida quando a de uma máquina de corrente contínua (CC) de excitação separada de torque idêntico, mas com tamanho e peso reduzidos. A única desvantagem num acionamento do motor de indução de campo orientado controlado é o maior custo na realização e implementação de estratégias de controle complexas em aplicações de campo em tempo real. Acionamentos de motores de indução de rotor de campo orientado indireto ou de vetor controlado, onde a posição do rotor é estimada ao invés de medida, são amplamente usados em VEs e VEHS para aplicações de alto desempenho.

Um MRC requer topologia especial de conversor, visto que é fundamentalmente diferente em estrutura de outras máquinas de corrente alternada (CA). Controle de frequência variável, tal como controlador de corrente de histerese, e controle de corrente baseada em frequência chaveada fixada, tal como o controle integral proporcional, têm sido desenvolvido e empregado amplamente. Pesquisadores também têm proposto controladores adaptativos/inteligentes empregando técnicas de inteligência artificial, tais como lógica fuzzy, controle de modo deslizante, controle emocional, redes neurais e algoritmos evolucionários e suas combinações. Esses métodos têm se mostrado eficazes em aplicações que requerem operações em quatro quadrantes, capacidade de rastreamento, robustez às perturbações da carga e menos erro de posição, tais como tração de VEHS ou VEs.

## **A Eletrônica de Potência**

Carregadores de bateria convencionais são *on-board* ou *off-board*. Os carregadores *on-board* têm limitações de custo, capacidade de manipulação de potência e tempo de recarga. Uma topologia de carregador integrado usando as eletrônicas de potência já disponíveis *on-board* pode ser usada para carregamento de bateria quando elas não são usadas para tração e isso pode levar à tecnologia de recarga rápida, ou emergencial. O desafio é projetar

conversores de eletrônica de potência que sejam compatíveis com o motor e o banco de baterias, que usualmente são fabricados por duas companhias diferentes. As empresas que projetam o sistema de acionamento do motor e o banco de baterias para o mesmo veículo podem ser coordenadas pelo fabricante de equipamento original (OEM) em um determinado caso. Devido à bateria ser carregada apenas quando o veículo está parado usando o mesmo conversor, reduções no custo inicial do veículo e no espaço usado podem ser conseguidas. Além disso, em determinados casos, os enrolamentos do motor podem ser usados como filtros para melhorar os problemas de qualidade de energia.

### **Multimotores**

Uma maneira de melhorar o desempenho do sistema de propulsão do VE é adicionar várias máquinas. Torna-se então uma questão de determinar se as vantagens de dispor de múltiplas máquinas prevalecem sobre o custo de adicioná-las. A principal vantagem esperada é um aumento significativo na eficiência do veículo, especialmente em veículos pesados tais como ônibus, onde espaço é a menor das preocupações. Um motor pode ser usado quando o ônibus estiver vazio e o outro pode ser adicionado quando a carga no ônibus exceder o máximo da(s) máquina(s). Tal sistema de acionamento do motor resultará em carga simétrica de todas as máquinas, operando-as próximo de suas condições nominais, que pode originar uma melhor eficiência do motor. A complexidade adicionada ao sistema leva à necessidade de estratégias de controle adaptativo, sistemas de engrenagens planetárias e engate das conexões mecânicas.

A tecnologia multimotor está atualmente sendo usada no sistema de propulsão elétrica do Mercedes SLS AMG. Quatro motores síncronos de ímã permanente compactos que combinados fornecem 552 kW e 1000 Nm, cada um pesando 45 kg e atingindo uma velocidade máxima de 13000 rpm, compõem o sistema de propulsão. Ele usa um único conceito de transmissão, permitindo que cada motor conduza seletivamente todas as quatro rodas. Isso ajuda na distribuição do torque em cada roda; entretanto, só é possível sob a desvantagem significativa de massas não suspensas com motores de cubo de roda.

Outra inovação recente em estudo é a integração do motor de tração abrigado dentro do aro da roda. Este design do motor na roda economiza espaço significativo e elimina a necessidade de transmissão, diferencial e partes mecânicas relacionadas. Reduzindo assim as

perdas por atrito. Os motores nas rodas também melhoram a tração por permitir um controle preciso sobre cada roda e eles permitem maior flexibilidade nos projetos dos veículos uma vez que não há a necessidade de acoplamentos mecânicos das rodas para um eixo de transmissão comum. Eles se mostram uma grande promessa no aumento da eficiência global.

### **Bateria de Íon de Lítio**

De acordo com [KAR, 2013], a implantação bem sucedida e a adoção em massa de VEs dependem fortemente do custo e do desempenho. Um dos grandes obstáculos atualmente enfrentado pelos fabricantes de VEs é o custo desproporcionalmente alto de fabricação associado ao banco de baterias do VE. Por exemplo, Allan Mulally, CEO da Ford Motors, indicou que o custo de fabricação de um banco de baterias para um VE Ford pode variar entre US\$ 12000,00 e US\$ 15000,00. Claramente, para alcançar a competitividade em longo prazo, este problema da bateria precisa ser resolvido.

Da tecnologia da bateria chumbo ácida com energia específica baixa de 30 Wh/kg no final do século 19, para as atualmente usadas baterias de íon de lítio (Li-íon), existem vários tipos de baterias químicas escolhidas como sistemas de armazenamento de energia (SAE) para o setor de transporte. Os principais requisitos para uma bateria são: 1) alta densidade de potência para garantir uma rápida aceleração do veículo e a capacidade de usar a energia da frenagem regenerativa, e 2) alta densidade de energia para garantir um alcance estendido. Baixo custo, ciclo de vida longo e segurança são outros requisitos chave.

Baterias Li-íon são a última tendência em baterias químicas. Com os valores nominais de tensão de célula de 3,2 a 3,65 V, de energia específica de 130 a 150 Wh/kg e de densidade de potência de 2300 a 2400 W/kg, essas baterias são consideradas uma das melhores para aplicação automotiva até agora. Baterias Li-íon contêm múltiplos anodos e catodos. Escolhendo cuidadosamente a estrutura, os requisitos de aplicação de potência e energia podem ser bem satisfeitos. Apesar de suas muitas vantagens, existe sempre uma troca entre desempenho e custo. A maior desvantagem da bateria de Li-íon é seu alto custo, que responde por mais de um terço do custo total do veículo. Outras desvantagens são o envelhecimento, requisitos de proteção térmica e tecnologia imatura comparada às baterias chumbo ácida e níquel hidreto metálico (NiMH).

A busca por tecnologias de baterias de VE melhoradas leva de volta aos anos 70. Uma das primeiras tecnologias praticáveis comercialmente adotadas pelos fabricantes automotivos foi a bateria NiMH. Baterias NiMH tornam-se a escolha para veículos híbridos recentes porque elas têm uma maior densidade de energia e são mais leves do que as baterias de chumbo ácida de potência compatível. Tanto que já são usadas em muitos VEHs atualmente, incluindo o Toyota Prius e o Honda Insight. Depois de testar várias alternativas, a Toyota anunciou em 2009 seu uso contínuo de baterias NiMH em muitos de seus veículos híbridos. Recentemente, fabricantes têm extensivamente iniciado o uso de Li-íon como a fonte de energia preferida, especialmente para aplicações em VE e em VEH Plug-in.

Em 2008, as baterias Li-íon eram consideradas muito caras para serem usadas em larga escala, custando em torno de 1200,00 US\$/kWh para entregar energia específica de 110 Wh/kg e densidade de potência de 1000 W/kg. Entretanto, com a invenção de novos eletrodos e materiais eletrólitos, a tecnologia avançou e o custo reduziu para 700,00 a 800,00 US\$/kWh em 2011. A energia específica e a densidade de potência aumentaram significativamente para mais de 120 Wh/kg e 1800 W/kg, respectivamente. Atualmente, essas baterias custam cerca de 400,00 a 500,00 US\$/kWh e tem uma energia específica de 130 a 140 Wh/kg e a densidade de potência de 2400 W/kg. Sua vida útil está em torno de 3500 ciclos. Em 2015, o custo esperado para baterias Li-íon é entre 200,00 e 300,00 US\$/kWh para um VEH Plug-in. Energia específica e densidade de potência esperados são de 250 a 300 Wh/kg e 3500 W/kg, respectivamente. Em 2020, com um custo esperado é de 100,00 a 150,00 US\$/kWh. Em 2013, a autonomia era de aproximadamente 38 a 40 mi (61 a 64 km) para um VEH Plug-in médio como o Chevy Volt e aproximadamente 100 mi (161 km) para um VEB como o Mitsubishi i-MiEV. A autonomia elétrica esperada é de 150 mi (241 km) em 2020.

A captação de energia é outra resposta para reduzir a carga no banco de baterias. A geração de eletricidade no próprio veículo sem conversão química pode aumentar significativamente a autonomia, estender a vida e melhorar o desempenho do dispositivo de armazenamento de energia. O conceito “*e-tire*” é um dos métodos de captação de energia usando a deflexão do pneu enquanto o veículo está em movimento. Mais especificamente, este novo conceito usa as alterações locais na pressão e na forma de um pneu veicular para gerar eletricidade. A ideia usa o princípio do magnetismo para gerar eletricidade dentro do pneu de um veículo numa nova maneira que ainda está para ser explorado em eletrificação de veículos. O rolamento das rodas nas estradas causa alterações locais na forma simétrica do pneu e o torna achatado na área de contato com a superfície da estrada. A deflexão dinâmica muda a distância radial entre o eixo da roda e a circunferência do pneu quando ele está em

contato com o solo. Esta deflexão localizada no pneu pode ser utilizada adotando um número de geradores lineares incorporados numa roda veicular.

Apoiado por incentivos do governo, o mercado de VEs pode crescer se instalações de recarga rápida (recarga em corrente contínua ou trifásica que exigirá carregadores deste tipo) adequadas forem disponibilizadas em localizações permanentes convenientes. Tais instalações de postos de recarga, atualmente chamados de “eletropostos”, em larga escala vão avançar a infraestrutura e tecnologia de recarga para VEs. Criará também uma tendência de carregamento de VEs junto a postos de recarga permanentes da mesma forma que os veículos à gasolina abastecem em postos de gasolina. O avanço em tecnologia de recarga tem caminhado de mãos dadas com o avanço em tecnologia de baterias.

Esses veículos conectados simultaneamente à rede consomem uma grande quantidade de energia elétrica. Essa demanda por potência elétrica pode conduzir a picos elevados e indesejáveis. Também, problemas de qualidade de energia, tais como baixo fator de potência e elevadas distorções harmônicas totais durante carga e descarga, podem causar mau funcionamento de equipamentos e falhas de componentes [KAR, 2013]. É uma preocupação econômica e de segurança para as concessionárias de energia visto que transformadores e alimentadores são propensos a sobrecargas. Por isso, o efeito das componentes harmônicas sozinho poderia ser um motivo para desligar a potência transferida entre a rede e o veículo. Igualmente, o efeito do aumento de carga e seu inerente baixo fator de potência no sistema de distribuição deveria ser considerado. Conforme o número de carros aumenta, a carga aumenta e, conseqüentemente, isso pode piorar a tendência atual de distorção harmônica. Eletropostos Nível 3 de maior eficiência são esperados para atenuar problemas de tempo de carregamento, quantidade de potência consumida e qualidade de energia. Além disso, o mercado de VEs pode expandir se instalações de recarga rápida adequadas forem fornecidas em locais permanentes e com conexões de alta amperagem a partir de um sistema de potência misto contendo no local rede elétrica e geradores eólicos ou painéis fotovoltaicos, por exemplo. Todavia, a questão do tratamento adequado da demanda e energia da recarga de veículos elétricos de forma mais realista é tratada neste trabalho tendo em vista tais problemas frequentemente assinalados na literatura técnica. Os testes realizados pela UERJ com medições de qualidade de energia e simulações de fluxo de potência harmônica, coerentes no âmbito do projeto de pesquisa e desenvolvimento Cidade Inteligente Búzios em parceria com a Ampla Energia e Serviços, no qual esta dissertação foi desenvolvida, mostraram que estas apreensões dependem da rede no qual são inseridas. Cidades turísticas como é o caso de

Búzios não apresentaram as restrições deste nível para a inserção gradativa de veículos elétricos.

As concessionárias de energia podem elas próprias gerir estes eletropostos, reduzindo suas preocupações com qualidade de energia, por terem maior controle sobre esses postos de recarga monitorados. É esperado que VEs disponíveis comercialmente sejam carregados dentro de 15 a 30 min com aproximadamente 80 % da capacidade da bateria usando um eletroposto de recarga rápida. Entretanto, eletropostos de recarga normal, não emergencial, encontrarão um excelente mercado e com preços pelo menos dez vezes menor que os de recarga rápida, se instalados em estacionamentos (públicos e privados), garages, shoppings e supermercados, uma vez que, nos centros urbanos, apenas de 10 a 15 % do tempo os carros particulares estão em movimento.

Enquanto alguns pesquisadores tentam resolver o problema da bateria do VE através de melhorias na química da bateria, outros estão tentando resolver o problema por meio alternativo externo à bateria. Estudos recentes tem mostrado a viabilidade para carregamento de VEs sem fio com mais de 90 % de eficiência do abastecimento útil para a bateria. Essa tecnologia tem sido chamada de Transferência de Energia por Indução (TEI) e a sua aplicação ao transporte eletrificado para recarga estática ou em movimento tem ganhado muita atenção mundialmente de fabricantes genuínos, agentes governamentais e institutos acadêmicos. Os proponentes da recarga de VE baseados na TEI visam reduzir o tamanho da bateria e, por extensão, seu custo associado assegurando que seja carregado mais frequentemente e sem problemas. O aumento na frequência de recarga seria realizado através de carregamento oportuno, em que VEs poderiam facilmente recarregar enquanto estão parados em um semáforo, por exemplo, ou até mesmo durante a condução ao longo de uma sessão eletrificada da estrada.

No coração dos sistemas de recarga de VE baseados em TEI existem duas das mais antigas e mais conhecidas leis do eletromagnetismo clássico: Lei de Ampère e Lei da indução de Faraday. A diferença fundamental entre a indução magnética moderna e a indução magnética de baixa frequência convencional, que já se encontra em uso a quase um século em dispositivos tais como transformadores e carregadores, é o uso de ressonâncias de alta frequência combinadas (i.e., > 60 Hz) nos dispositivos de fonte e receptor envolvidos na troca de energia, tanto quanto a facilidade de transferência de potência eficiente através de distâncias maiores.

A distância e o alinhamento entre as estruturas indutivas primária e secundária desempenham um papel crucial em todos os sistemas acoplados magneticamente, mas

especialmente em sistemas modernos de TEI. O coeficiente de acoplamento magnético quantifica a energia magnética gerada no primário que acaba sendo capturada pelo secundário. Sistemas de acoplamento indutivos convencionais são fortemente acoplados, tendo coeficientes de acoplamento na faixa de 0,92 a 0,98. Em contrapartida, em carregadores *wireless* baseados em TEI, a grande separação e o desalinhamento possível entre o primário e o secundário resultam em coeficientes que estão tipicamente na faixa de 0,1 a 0,4, tornando tais sistemas muito fracamente acoplados. Por sua vez, esse acoplamento magnético muito fraco resulta em campos de folga muito grandes. Estes campos dispersos são perdidos a partir da perspectiva da transferência de potência do primário para o secundário e também produzem reatâncias indutivas grandes que podem ser modeladas como estando em série com os enrolamentos das estruturas magnéticas primárias e secundárias. Essas reatâncias grandes limitam severamente o fluxo de corrente primária e secundária, conseqüentemente, compensação capacitiva do primário e do secundário e operação em ressonância são necessárias para reduzir a reatância aos níveis administráveis.

O design de um sistema de carregamento de VEs sem contato típico baseado em TEI ressonante folgado envolve pelo menos quatro desafios principais: 1) o design de estruturas de baixa perda e alto acoplamento eletromagnético que participará na troca de energia magnética; 2) o design de um circuito eficiente de alta potência e alta frequência, conhecido como fonte de energia da TEI, capaz de conduzir todo o sistema; 3) o processamento e o condicionamento da energia recebida no lado secundário; e 4) o controle automatizado de todo o sistema. Com o padrão regular de carregamento *wireless* da Society of Automotive Engineers (SAE), SAEj2954, devendo ser concluído em 2015, muito trabalho está atualmente sendo empreendido por instituições para fazer do carregamento *wireless* uma realidade prática e atrativa, que tem o potencial de cativar consumidores que ainda estão relutantes a abraçar plenamente os VEs.

### **Teste de Propulsão Elétrica**

O ensaio preciso e a avaliação dos componentes e algoritmos de controle é um estágio importante em pesquisa e desenvolvimento de várias tecnologias para o transporte eletrificado. Geralmente, o testador do sistema de direção é um sistema regenerativo que pode ser usado para testar a máquina elétrica, eletrônica de potência, algoritmos de controle e

desempenho da bateria introduzindo o ciclo de condução do veículo e as características do motor. D&V, Horiba, AVL e A&D Technologies têm todos os produtos especificamente para testar componentes de veículos híbridos e elétricos. A peça central do sistema é um dinamômetro poderoso capaz de aplicar o torque de carga do ciclo de condução. Para apoiar o dinamômetro, todos os sistemas incluem um inversor de frequência, que se alimenta de um link de corrente alternada (CA) variável que pode ser usado para modelar a bateria. A maioria dos sistemas são regenerativos por natureza, isto é, quando a máquina em teste é freada sua energia é regenerada para o link CA, onde pode ser usada para ajudar na potência da própria máquina de teste. Esta reciclagem de energia significa que menos energia tem que ser puxada pela rede, o que reduz o custo de testes longos. Esta é uma grande questão para um teste de resistência que pode levar dias.

## **Descrição da Estrutura do Trabalho**

Este trabalho tem como tema central o estudo e análise dos efeitos da recarga de diferentes veículos elétricos na curva de demanda de um transformador típico.

Com o intuito de seguir uma linha de raciocínio coerente e de fácil compreensão, este trabalho é dividido em três capítulos numerados, seguidos das considerações finais.

O primeiro capítulo introduz algumas características analíticas referentes aos veículos de transporte, a fim de informar aspectos importantes sobre os fenômenos de transporte, o sistema de energia que abastece os veículos à combustão interna e o que abastece os veículos elétricos, as características do abastecimento de energia dos VEs rodoviários, a conversão eletromecânica de energia que rege o sistema de propulsão veicular elétrica, os veículos elétricos de forma geral e, finalmente, a simulação de sistemas de natureza aleatória. Estas informações são a base para o entendimento tanto do contexto deste trabalho quanto da metodologia apresentada.

Na sequência, o segundo capítulo apresenta de forma qualitativa a descrição completa do desenvolvimento de toda a metodologia de simulação do reabastecimento de veículos elétricos. Para tanto, este capítulo apresenta a caracterização da recarga de veículos elétricos à bateria, foco do trabalho, os efeitos da recarga de veículos elétricos em transformadores, a curva de recarga de veículos rodoviários leves e ciclomotores elétricos, a descrição das normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) relacionadas aos assuntos



abordados neste trabalho, os ensaios de percurso e de recarga, cujos resultados serviram de base para a modelagem da curva de recarga de veículos elétricos, a superposição da curva de recarga de veículos elétricos à curva de demanda do transformador e um fluxograma descrevendo, de forma esquemática, a sequência de simulações empregadas.

Conhecida a metodologia, o terceiro capítulo desta dissertação apresenta os resultados, as análises e as discussões referentes às simulações citadas no capítulo anterior. É neste capítulo que se encontram os dados quantitativos que dão sustentação à metodologia desenvolvida. Neste capítulo, os itens foram organizados de forma didática a fim de facilitar o entendimento da sequência gradual do raciocínio utilizado para avaliar os efeitos, em um transformador, do reabastecimento de energia dos veículos elétricos, da forma mais realista possível. Para tanto este capítulo apresenta a simulação computacional utilizada, o cenário adotado para este trabalho, os efeitos da simulação determinística e os das simulações probabilísticas da distância percorrida pelos veículos, do horário de conexão destes à rede e de ambos simultaneamente, durante a recarga dos VEs. De posse dos resultados das simulações, é apresentada a comparação desses resultados, uma estimativa das emissões evitadas com o uso de VEs, o comparativo dos gastos com reabastecimento dos VCIs e dos VEs, e a previsão das estimativas oriundas das simulações probabilísticas.

Finalmente, encerrando esta dissertação que contribui para a introdução dos veículos elétricos no Brasil, o capítulo considerações finais apresenta as conclusões deste trabalho e as proposições sugeridas para trabalhos futuros.

## 1 REFERENCIAL TEÓRICO

### 1.1 Fenômenos de Transporte

Segundo [LIVI, 2004], denominam-se Fenômenos de Transporte o estudo de mecânica dos fluidos, transmissão de calor e transferência de matéria. Verifica-se que diferentes fenômenos difusivos da mecânica dos fluidos, da transmissão de calor e da transferência de matéria podem ser descritos por um modelo matemático comum, onde a diferença está nas grandezas físicas envolvidas e seus respectivos coeficientes de difusão, de forma que esses assuntos passaram a ser estudados conjuntamente com o nome de Fenômenos de Transporte.

O transporte de quantidade de movimento, a transmissão de calor e a transferência de matéria surgiram como ramos independentes da física clássica há muito tempo, mas o estudo unificado destas disciplinas tem constituído uma área fundamental da engenharia. Este desenvolvimento, por sua vez, iniciou-se há meio século, continua avançando e encontrando aplicações em novos campos como a biotecnologia, a microeletrônica, a nanotecnologia e a ciência dos polímeros, conforme [BIRD, 2006].

A evolução dos fenômenos de transporte tem sido tão rápida e extensa que é impossível abordá-la por completo em um único livro. Considerados durante muito tempo melhor como um tema matemático, os fenômenos de transporte são mais significativos por sua importância física. A essência deste tema constitui a declaração cuidadosa e concisa dos princípios de conservação, junto com as expressões de fluxo, salientando as semelhanças e as diferenças entre os três processos de transporte considerados. Muitas vezes, a especialização para as condições de contorno e propriedades físicas em um problema específico podem fornecer informações úteis com o mínimo esforço.

O domínio do fenômeno de transportes compreende três áreas estreitamente relacionadas: a mecânica dos fluidos, a transmissão de calor e a transferência de matéria. A mecânica dos fluidos refere-se ao transporte de quantidade de movimento, a transmissão de calor trata do transporte de energia, aplicada, por exemplo, à recarga de energia das baterias dos veículos elétricos, e a transferência de matéria estuda o transporte de matéria de várias espécies químicas. Em um nível introdutório estes três fenômenos de transporte devem ser estudados juntos pelas seguintes razões:

- a) Muitas vezes ocorrem simultaneamente em problemas industriais, biológicos, agrícolas e meteorológicos; de fato, o desenvolvimento de qualquer processo de transporte de forma individual é uma exceção e não uma regra;
- b) As equações básicas que descrevem os três fenômenos de transporte estão muito relacionadas entre si. A semelhança das equações em condições simples é a base para resolver problemas “por analogia”;
- c) As ferramentas matemáticas necessárias para descrever estes fenômenos são muito semelhantes. Saber como aplicar a matemática pode ter um resultado indireto muito útil no estudo deste assunto;
- d) Os mecanismos moleculares que constituem a base dos diversos fenômenos de transporte têm uma estreita relação entre si. Toda a matéria é feita de moléculas, e os mesmos movimentos e interações moleculares são responsáveis pela viscosidade, pela condutividade térmica e pela difusão.

O transporte de matéria, de quantidade de movimento e de energia pode ser descritos em três níveis distintos: macroscópico, microscópico e molecular.

No nível macroscópico se nota um conjunto de equações denominadas “balanços macroscópicos”, que descrevem como mudam a matéria, a quantidade de movimento e a energia em um sistema devido à introdução e eliminação destas entidades por correntes que entram e saem, e também devido a outras entradas ao sistema provenientes do entorno. Não é feita nenhuma tentativa para entender todos os detalhes do sistema. Ao estudar um sistema de engenharia ou um biológico é conveniente começar com esta descrição macroscópica a fim de fazer uma avaliação global do problema; em alguns casos tudo o que é necessário é a visão geral. O nível macroscópico do transporte de energia se enquadra perfeitamente, por exemplo, ao estudo da recarga de veículos elétricos.

Já no nível microscópico se analisa o que está ocorrendo em uma mistura de fluidos em uma pequena região dentro do equipamento. Nota-se um conjunto de equações denominadas “equações de variação”, que descrevem como a matéria, a quantidade de movimento e a energia mudam dentro desta pequena região. O objetivo aqui consiste em obter informações sobre a velocidade, a temperatura, a pressão e os perfis de concentração dentro do sistema. Esta informação mais detalhada pode ser necessária para compreender alguns processos.

Finalmente, no nível molecular se busca uma compreensão fundamental dos mecanismos de transporte de matéria, de quantidade de movimento e de energia em termos da

estrutura molecular e das forças intermoleculares. Em geral, este é o domínio do físico teórico ou do físico-químico, embora haja ocasiões em que os engenheiros e os cientistas aplicados devem participar deste nível. Isto é particularmente verdadeiro se os processos que se está estudando implicam em moléculas complexas, intervalos extremos de temperatura e pressão, ou sistemas quimicamente reativos.

Segundo [BIRD, 2006], deve ficar evidente que estes três níveis de descrição envolvem diferentes “escalas de comprimento”: Por exemplo, em um problema industrial típico, no nível macroscópico as dimensões dos sistemas de fluxo podem ser da ordem de centímetros ou metros; o nível microscópico implica no que está ocorrendo no intervalo de microns a centímetros; e os problemas em nível molecular contemplam intervalos aproximados de 1 a 1000 nanômetros.

Para utilizar de maneira inteligente os balanços macroscópicos é necessário valer-se de informações sobre transporte de interface que vem das equações de mudança. Para usar estas equações são necessárias as propriedades de transporte que são descritas por várias teorias moleculares. Conseqüentemente, do ponto de vista acadêmico, é melhor começar os estudos no nível molecular e progredir para sistemas maiores.

De acordo com o Quadro Geral de Unidades de Medida apresentado na Regulamentação Metrológica, estabelecida pelo Conselho Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (CONMETRO), na Resolução n.º 01/82, descrita em [CONMETRO, 1982], a terminologia de fluxo, densidade de fluxo e quantidade de movimento (momento linear) seguem as seguintes definições:

*“Fluxo de massa, com unidade quilograma por segundo (kg/s), é o fluxo de massa de um material que, em regime permanente através de uma superfície determinada, escoar a massa de 1 quilograma do material em 1 segundo.”*

*“Potência ou fluxo de energia, com unidade watt (W), é a potência desenvolvida quando se realiza, de maneira contínua e uniforme, o trabalho de 1 joule em 1 segundo.”*

*“Densidade de fluxo de energia, com unidade watt por metro quadrado ( $W/m^2$ ), é a densidade de um fluxo de energia uniforme de 1 watt, através de*

*uma superfície plana de 1 metro quadrado de área, perpendicular à direção de propagação da energia.”*

*“Momento linear, com unidade quilograma metro por segundo (kg.m/s), é o momento linear de um corpo de massa igual a 1 quilograma, que se desloca com velocidade de 1 metro por segundo.”*

### **Conceitos e Definições Fundamentais**

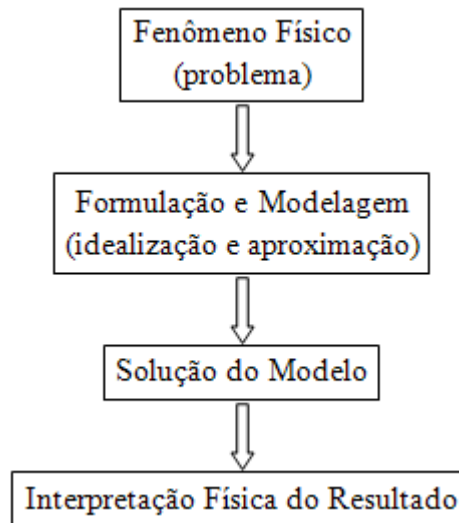
**Meio Contínuo:** A matéria tem uma estrutura molecular e existe, normalmente, em três estados: sólido, líquido e gasoso. O número de moléculas normalmente existentes em um volume macroscópico é enorme. Para termos uma ideia da ordem de grandeza do número de partículas envolvidas, em condições normais de temperatura e pressão, existem cerca de  $10^{19}$  moléculas em um volume de  $1 \text{ cm}^3$  de ar atmosférico. Com esse número tão grande de partículas é praticamente impossível a descrição do comportamento macroscópico da matéria, como, por exemplo, o estudo do escoamento de um fluido, a partir do movimento individual de suas moléculas.

No que se refere aos problemas comuns de engenharia, geralmente estamos interessados no comportamento macroscópico devido aos efeitos médios das moléculas existentes no sistema em estudo, e, sendo a abordagem microscópica (descrição a partir dos movimentos individuais das moléculas) inconveniente, necessita-se de um modelo mais adequado.

No estudo da natureza e na solução dos problemas encontrados na engenharia, em geral, estão presentes os princípios de idealização e aproximação, ou seja, de modelagem. A descrição dos fenômenos físicos e a abordagem e solução dos problemas podem ser esquematizadas conforme a Figura 1.1.

O conceito de meio contínuo é uma idealização da matéria, ou seja, é um modelo para o estudo de seu comportamento macroscópico em que se considera uma distribuição contínua de massa.

Figura 1.1 – Esquema da abordagem e solução de um fenômeno físico



Fonte: [LIVI, 2004] (adaptado pelo autor, 2015).

**Massa Específica:** A massa específica  $\rho$ , definida como a massa por unidade de volume, é uma propriedade que ilustra bem o conceito de meio contínuo. Por definição, considerando o modelo de meio contínuo, a massa específica em um ponto é dada por:

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow \delta V} \frac{\Delta m}{\Delta V} \quad (1.1)$$

Onde:  $\Delta m$  é a massa contida no volume  $\Delta V$ ;

$\delta V$  é o menor volume, em torno do ponto, que contém um número suficiente de moléculas para que exista uma média estatística definida, ou seja, é o limite da validade do modelo de meio contínuo.

**Volume Específico:** O volume específico  $v$  é, por definição, o volume ocupado pela unidade de massa de uma substância, ou seja, é o inverso da massa específica, sendo dado por:

$$v = \frac{1}{\rho} \quad (1.2)$$

**Peso Específico:** O peso específico  $\gamma$  de uma substância é o seu peso por unidade de volume, com módulo dado por:

$$\gamma = \rho g \quad (1.3)$$

Onde:  $g$  é a aceleração da gravidade.

**Densidade Relativa:** A densidade relativa  $d$  de uma substância  $A$  expressa o quociente entre a massa específica dessa substância  $A$  e a massa específica de uma outra substância  $B$ , tomada como referência. Por definição, a densidade relativa é dada por:

$$d = \frac{\rho_A}{\rho_B} \quad (1.4)$$

Geralmente, a substância de referência para o caso de líquidos é a água e, para o caso de gases, é o ar. A densidade relativa independe do sistema de unidades, pois é dada por um valor adimensional.

### Forças de Corpo e de Superfície

De uma maneira geral, as forças podem ser classificadas em duas categorias:

- a) Forças de corpo ou de campo;
- b) Forças de superfície ou de contato.

As forças de corpo são aquelas que se manifestam através da interação com um campo e atuam sem a necessidade de um contato entre as superfícies dos corpos. Exemplo:

- a) Peso, devido ao campo gravitacional;
- b) Força elétrica, devido a um campo elétrico;
- c) Força magnética, devido a um campo magnético.

Essas forças de corpo são proporcionais ao volume dos corpos.

As forças de superfície são aquelas que atuam sobre um sistema através de contato com a fronteira do mesmo. Exemplo:

- a) Forças de atrito;
- b) Forças devido à pressão;
- c) Forças devido às tensões cisalhantes nos escoamentos.

Essas forças de superfície são proporcionais à área da superfície sobre a qual atuam.

### Tensão e Componentes da Tensão

A especificação das componentes da tensão, que têm a dimensão de força por unidade de área, necessita da indicação da direção da componente da força e, também, da indicação da orientação da superfície onde atua a tensão. Uma notação de duplo índice fornece uma descrição conveniente para as componentes da tensão, representadas por  $T_{ij}$ , em que o primeiro índice  $i$  identifica a direção da normal ao plano no qual a força atua, e o segundo índice  $j$  fornece a direção da componente da força ou da tensão, propriamente. Assim, as componentes da tensão com a notação apresentada podem ser definidas por:

$$T_{ij} = \lim_{\Delta A_i \rightarrow 0} \frac{\Delta F_j}{\Delta A_i} \quad (1.5)$$

Se os índices forem iguais ( $i = j$ ) tem-se uma componente de tensão normal representada por  $\sigma_{ii}$  e se os índices forem diferentes ( $i \neq j$ ) tem-se uma componente de tensão cisalhante (tangencial), representada por  $\tau_{ij}$ .

Para um elemento de área  $\Delta A_x$ , com normal na direção  $x$ , sobre o qual atuam as componentes de força  $\Delta F_x$ ,  $\Delta F_y$  e  $\Delta F_z$  nas direções  $x$ ,  $y$  e  $z$ , respectivamente, resultam em uma componente de tensão normal  $\sigma_{xx}$  e duas componentes de tensão cisalhante (tangencial)  $\tau_{xy}$  e  $\tau_{xz}$ . Da mesma maneira, considerando elementos de área  $\Delta A_y$  e  $\Delta A_z$ , com normais nas direções  $y$  e  $z$ , respectivamente, são definidas as componentes de tensão  $\sigma_{yy}$ ,  $\tau_{yx}$ ,  $\tau_{yz}$ ,  $\sigma_{zz}$ ,  $\tau_{zx}$  e  $\tau_{zy}$ . A tensão em um ponto é especificada pelas nove componentes da matriz Tensor Tensão abaixo:

$$\bar{T} = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_{zz} \end{bmatrix} \quad (1.6)$$



Considerando um elemento de volume tetraédrico, com três faces orientadas ao longo dos planos coordenados de um sistema de coordenadas retangulares, Cauchy demonstrou que com o conhecimento da matriz tensão, com as componentes relativas às direções dos eixos coordenados, pode-se calcular a tensão, no mesmo ponto, relativa a qualquer outra direção. Considerando uma superfície cuja orientação é dada por um vetor unitário normal  $\vec{n}$  expresso em termos de seus cossenos diretores  $a$ ,  $b$  e  $c$  em relação aos eixos de um sistema de coordenadas retangulares com vetores unitários direcionais  $i, j$  e  $k$ , de forma que:

$$\vec{n} = a\vec{i} + b\vec{j} + c\vec{k} \quad (1.7)$$

Sendo:

$$a = \vec{n} \cdot \vec{i}; \quad b = \vec{n} \cdot \vec{j} \quad \text{e} \quad c = \vec{n} \cdot \vec{k} \quad (1.8)$$

e

$$a^2 + b^2 + c^2 = 1 \quad (1.9)$$

Resulta que, pela relação de Cauchy, a tensão na direção  $\vec{n}$  é dada por:

$$\vec{T}(\vec{n}) = \bar{\bar{T}}\vec{n} \quad (1.10)$$

Onde:  $\bar{\bar{T}}$  é a matriz tensão da equação (1.6).

### Características Básicas dos Fluidos

Fluido é a substância que se deforma continuamente sob a ação de uma tensão cisalhante (tangencial), por menor que seja a tensão de cisalhamento aplicada.

Os sólidos e os fluidos apresentam comportamentos diferentes quando submetidos a uma tensão cisalhante, pois as forças de coesão interna são relativamente grandes nos sólidos e muito pequenas nos fluidos. Um sólido, quando submetido a um esforço cisalhante, resiste à

força externa sofrendo uma deformação definida de um ângulo  $\theta$ , desde que não seja excedido o limite de elasticidade do material.

Os fluidos, com a aplicação de uma tensão cisalhante, se deformam continuamente e indefinidamente enquanto existir essa tensão tangencial, resultando em uma taxa de deformação  $\frac{d\theta}{dt}$ , pois o ângulo de deformação é função do tempo,  $\theta = \theta(t)$ , no lugar de um ângulo de deformação característico que ocorre no caso dos sólidos.

De uma maneira geral, os fluidos são classificados como newtonianos e não-newtonianos. Essa classificação considera a relação existente entre a tensão cisalhante aplicada e a taxa de deformação sofrida por um elemento fluido. Tem-se um fluido newtoniano quando a tensão cisalhante aplicada é diretamente proporcional à taxa de deformação sofrida por um elemento fluido. Caso contrário, são classificados como fluidos não-newtonianos. A água e o ar, por exemplo, são fluidos newtonianos.

Por fim, a viscosidade é a propriedade associada à resistência que o fluido oferece à deformação por cisalhamento. De outra maneira, pode-se dizer que a viscosidade corresponde ao atrito interno nos fluidos devido, basicamente, às interações intermoleculares, sendo, em geral, função da temperatura.

## 1.2 Sistemas de Energia para Veículos de Transporte

O setor de transportes brasileiro é hoje, quase em sua totalidade, suprido pela energia oriunda do refino do petróleo e da cana-de-açúcar. Dos derivados do petróleo, os destinados ao transporte são a Gasolina, o Óleo Diesel, o Biodiesel e o Gás Natural Veicular (GNV). Já da cana-de-açúcar o único derivado utilizado como fonte de energia para abastecer o setor de transportes é o Álcool Etílico (Etanol).

Porém, devido principalmente aos impactos ambientais mencionados no capítulo anterior, causados pelos VCIs, o setor de transportes está passando por uma transformação significativa que visa à redução das emissões de gases agravantes do efeito estufa, CO<sub>2</sub> fóssil, e de graves poluidores do ar atmosférico, dos quais apenas alguns são legislados e afetam a qualidade de vida nos centros urbanos. Para isso, os tradicionais VCIs estão gradativamente sendo substituídos pelos VEs. O sistema de energia para veículos de transporte está sendo

direcionado para outros provedores, as geradoras, transmissoras e distribuidoras de eletricidade. O setor de transportes está sendo “eletrificado”!

### Fluxo de Energia Destinada aos VCIs

Segundo dados do Balanço Energético Nacional (BEN), apresentado em [EPE, 2014], em 2013, com relação à produção de energia primária, o petróleo contribuiu com 40,6 % do total e a cana-de-açúcar com 19,1 %. Com relação à oferta interna de energia (contabilizando importações e exportações de energia), o petróleo e seus derivados ofertaram 39,3 % de toda a energia disponível e os derivados da cana-de-açúcar contribuíram com 16,1 %.

O setor de transportes consome 32 % de toda a energia disponível no país, deste total, 92,5 % é destinado ao transporte rodoviário, ou seja, 29,6 % de toda a energia disponível no país é destinada ao abastecimento do transporte rodoviário. A Tabela 1.1 apresenta o consumo final de toda a energia destinada ao abastecimento do transporte rodoviário, pelas principais fontes de energia do setor de transportes.

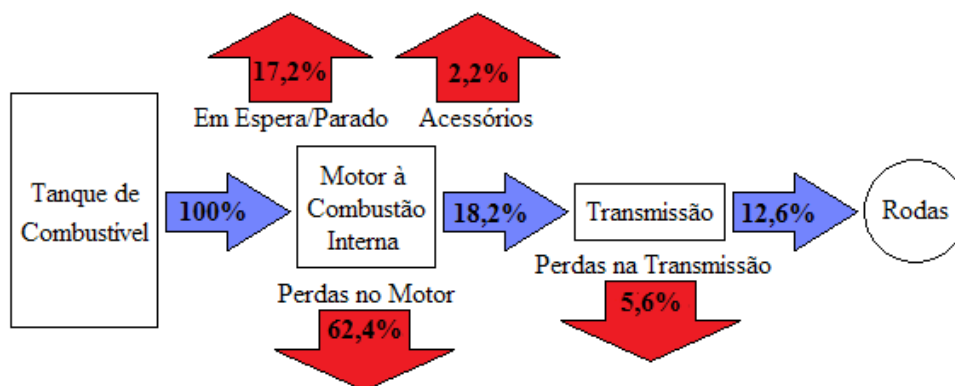
Tabela 1.1 – Consumo de energia por fonte no transporte rodoviário

Fontes	Consumo
Gasolina	31,7 %
Etanol	15,4 %
Diesel	48,2 %
Biodiesel	2,5 %
GNV	2,1 %

Fonte: EPE, 2014.

Com relação ao fluxo de energia do sistema de propulsão veicular, os veículos à combustão interna (VCI) possuem uma eficiência muito baixa. Estudos mostram que, em média, apenas 12,6 % de toda a energia presente nos combustíveis é entregue às rodas do veículo para seu deslocamento. Quase 80 % das perdas se concentram no motor. Essa é uma grande desvantagem dos veículos à combustão interna.

A Figura 1.2 mostra um esquema com as perdas de energia média nos veículos leves rodoviários à combustão interna e o quanto é entregue às rodas. Este esquema é denominado *Tank-To-Wheel*.

Figura 1.2 – Fluxo médio de energia *Tank-To-Wheel*

Fonte: Palestra sobre o i-MiEV da Mitsubishi na UERJ (adaptado pelo autor, 2015).

Em uma análise energética geral, tem-se, então, que a energia total armazenada nos tanques de combustível dos veículos leves rodoviários (100 % na Figura 1.2) equivale a 29,6 % da energia do país. Logo, a energia final entregue às rodas desses veículos (12,6 % na Figura 1.2) equivale a 3,7 % de toda a energia do país.

### Fluxo de Energia Destinada aos VEBs

No entanto, segundo dados do BEN, apresentado em [EPE, 2014], no ano de 2013, com relação à produção de energia primária, a energia hidráulica contribui com 13 % do total, o carvão e a lenha com 10,8 % (termoelétricas), o urânio com 0,9 % (nuclear) e outras fontes renováveis, como eólica e solar, com 4,8 %. Com relação à oferta interna de energia (contabilizando importações e exportações de energia), a hidráulica oferta 12,5 % de toda a energia disponível, o carvão vegetal e a lenha contribuem com 8,3 %, o urânio com 1,3 % e outras fontes renováveis com 4,2 %.

A equivalência, segundo primeiro princípio da termodinâmica, adotada no BEN 2014, 1 kWh = 860 kcal, indica que a energia elétrica corresponde a 17,7 % de toda a oferta de energia do país. Em contrapartida, apenas 1,9 % da energia do país é destinada ao setor de transportes, além disso, 0 % dessa energia é direcionada para o transporte rodoviário.

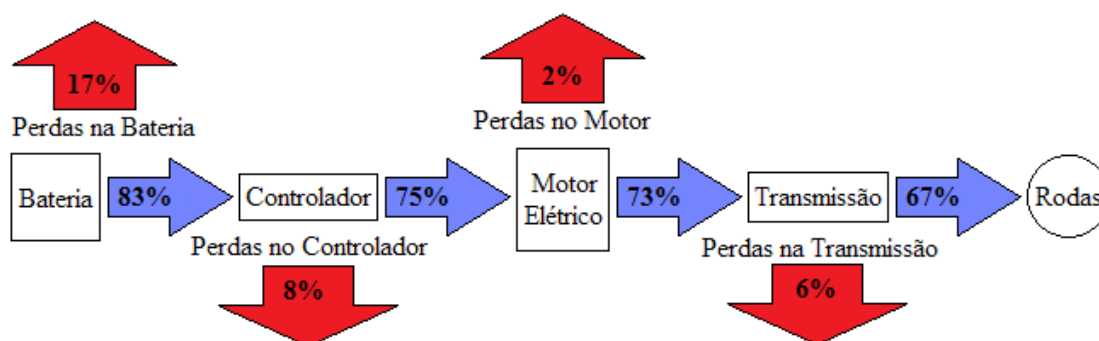
Segundo BEN 2014 a participação de cada fonte geradora na composição de toda a oferta de energia elétrica do país é distribuída conforme a Tabela 1.2.

Tabela 1.2 – Oferta de energia elétrica do país

Fontes	Oferta
Hidráulica	70,6 %
Derivados do Petróleo	4,4 %
Carvão e Derivados	2,6 %
Nuclear	2,4 %
Gás Natural	11,3 %
Biomassa	7,6 %
Eólica	1,1 %

Fonte: EPE, 2014.

Os veículos elétricos à bateria são muito mais eficientes, no que diz respeito ao fluxo de energia em seu sistema de propulsão. Segundo estudos, a energia total entregue às rodas equivale a cerca de 67 % da energia armazenada nas baterias, conforme mostrado na Figura 1.3. Este esquema é denominado *Battery-To-Wheel*.

Figura 1.3 – Fluxo médio de energia *Battery-To-Wheel*

Fonte: Palestra sobre o i-MiEV da Mitsubishi na UERJ (adaptado pelo autor, 2015).

Como se pode notar, os veículos elétricos à bateria possuem uma grande vantagem, em termos de eficiência, quando comparados aos veículos à combustão interna. Sistemas de propulsão veicular elétricos não possuem grandes perdas por não terem grandes interações mecânicas entre os componentes que os constituem, sendo assim, as perdas por atrito, por exemplo, são praticamente nulas.

Com base nas Figuras 1.2 e 1.3, constata-se que os veículos elétricos têm um aproveitamento de seu sistema de energia superior a 5 vezes ao dos veículos à combustão interna.

## Comparação entre o Sistema de Energia dos VCIs e dos VEs

Devido à porcentagem de energia elétrica consumida pelo transporte rodoviário ser nula, por não haver ainda veículos elétricos suficientes para consumir tal energia, não é possível fazer uma análise energética geral mostrando qual a quantidade de energia do país é entregue às rodas dos veículos elétricos. Entretanto, estudos no Laboratório de Sistemas de Propulsão Veicular e Fontes Eletroquímicas (LSPV) da UERJ e dados do Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE), apresentado em [INMETRO, 2015], mostram que os VEs possuem um consumo energético cerca de 2,3 a 8,6 vezes menor que o dos VCIs, quando comparado o Nissan Leaf 2010, cujo consumo energético é de 0,62 MJ/km [ELECTROMAPS, 2015], com os dos VCIs apresentados no PBE 2015, cuja faixa de consumo energético está entre 1,45 e 5,35 MJ/km. Portanto, se todos os VCIs fossem substituídos por VEBs, como o Nissan Leaf, e toda a energia destinada ao transporte rodoviário (29,6 % da energia consumida no país) fosse utilizada para gerar eletricidade para alimentar os VEBs, a energia consumida pelo transporte rodoviário diminuiria para 3,4 a 12,9 % de todo o consumo de energia do país. Logo, o país teria um crédito aproximado entre 16,7 e 26,2 % de energia elétrica não consumida que poderia ser direcionada para outros setores menos favorecidos energeticamente, diminuir a geração nessa porcentagem ou, até mesmo, ser exportada. Em valores reais, utilizando o coeficiente de equivalência 0,086 tep/MWh adotado no BEN 2014, o Brasil teria, então, de 505,3 a 792,7 TWh de energia sobrando!

Outro fator que desfavorece o VCI e favorece significativamente o VE é a questão ambiental relacionada a exploração, produção, refino, armazenamento, transporte e novo armazenamento da energia para abastecimento desses veículos. No caso dos VCI, a energia (combustível) é produzida numa refinaria gerando uma grande quantidade de poluentes atmosféricos, em seguida esta energia é armazenada em caminhões tanque, que na negligência de manutenção pode haver vazamento contaminando, assim, o solo. Este caminhão, por sua vez, transporta o combustível por longas distâncias das refinarias aos postos, poluindo o ar por onde passam. Nos postos, o combustível (energia) é armazenado em enormes tanques subterrâneos, que novamente na negligência de manutenção periódica pode haver vazamento, contaminando o solo. Finalmente, após serem abastecidos, os VCIs poluem o ar atmosférico à medida que consome a energia com a queima do combustível. Logo, o sistema de energia para os VCIs emite gases poluentes desde a refinaria até o consumidor final, além do risco de contaminação do solo em algumas etapas deste sistema.

Quando se analisa o sistema de energia para os VE, no entanto, percebe-se que este é bem mais simples. A energia elétrica é gerada por fontes predominantemente renováveis, conforme mostrado na Tabela 1.2, onde 74,1 % dessa energia é oriunda de fontes não poluentes (hidráulica, eólica e nuclear). Essa energia é, então, transportada via cabo pelo sistema de transmissão de energia elétrica até as estações de recarga dos VEs, logo, o sistema de energia dos VEs emite zero de gases poluentes também durante o transporte de sua energia. Além disso, não existe a necessidade de armazenamento dessa energia como ocorre nos postos de combustíveis, a energia elétrica está disponível para ser consumida a qualquer momento. A recarga dos VEs não necessita da infraestrutura como a de um posto de combustível, um simples painel de recarga instalado em qualquer lugar acessível ao VE pode recarregá-lo, inclusive em casa. E, finalmente, após recarregarem, os VEs não poluem à medida que consomem a energia armazenada em suas baterias.

É interessante resaltar que as bombas, assim como outras partes dos postos de combustíveis, necessitam de energia elétrica para funcionar. É possível, então, perceber a grande vantagem do sistema de energia dos VEs frente ao dos VCIs.

### **1.3 Abastecimento de Energia de Veículos Elétricos Rodoviários**

A recarga da bateria de um veículo elétrico rodoviário requer um controle cuidadoso da tensão e da corrente. Se for feito de forma inadequada pode facilmente danificá-las.

A energia para recarregar uma bateria será proveniente quase sempre de uma fonte de tensão e corrente alternada (CA). Como as baterias são fontes de tensão constante, esta corrente necessariamente terá que ser previamente retificada para corrente contínua (CC). Esta retificação é feita pela eletrônica de potência dos carregadores.

Uma questão importante relativa aos carregadores de bateria é a padronização para o carregamento de veículos elétricos em locais públicos, certificando-se que todos os veículos podem se conectar com segurança a qualquer painel de recarga.

### **Equalização da carga**

Um problema com todas as baterias é que quando a energia é extraída, nem todas as células da bateria perdem a mesma quantidade de carga. Apesar de a corrente ser a mesma, os efeitos da auto descarga fazem com que diferentes taxas sejam extraídas de diferentes células. Isto ocorre devido às variações no processo de fabricação e na temperatura de cada célula.

Se a bateria é recarregada com carga suficiente para as células boas, as células mais propensas à auto descarga não serão totalmente recarregadas, o que pode danificar rapidamente a bateria, diminuindo sua vida útil, [LARMINIE,2003]. A maneira de se evitar isso é carregar totalmente a bateria até que cada célula esteja totalmente carregada. Este processo é conhecido como Equalização da Carga. Inevitavelmente, algumas células serão executadas por várias horas, ficando assim, sobrecarregadas.

### **Capacidade de carga**

A carga elétrica que uma bateria pode fornecer é claramente seu parâmetro mais importante. No Sistema Internacional (SI), a unidade é o Coulomb (C), que é a carga quando 1 Ampère flui por 1 segundo. Usualmente, usa-se o Ampère-hora (Ah), que é a carga quando 1 Ampère flui por 1 hora. A capacidade de uma bateria pode ser, por exemplo, 10 Ah. Isto quer dizer que essa bateria pode proporcionar 1 A por 10 h, ou 2 A por 5 h, ou, na teoria, 10 A por 1 h. Contudo, na prática não é assim que se comportam as baterias. A capacidade das grandes baterias utilizadas em veículos elétricos, chamadas baterias de tração, é geralmente especificada para uma descarga de 5 horas.

### **Energia armazenada**

O objetivo da bateria é armazenar energia. A energia armazenada depende da sua tensão, em Volt (V), e da carga armazenada. No SI, essa carga é dada em Joule (J), contudo



isso é um inconveniente, adota-se então o Watt-hora (Wh), que é a energia equivalente ao trabalho de uma potência de 1 W por 1 h. A conversão é  $1 \text{ Wh} = 3600 \text{ J}$ .

A energia armazenada é uma quantidade bastante variável e se reduz quando a energia é liberada rapidamente. Conforme mencionado, normalmente a capacidade é dada para uma descarga de cinco horas, então logicamente a energia deve ser dada para esse tempo de descarga.

### **Energia Específica**

Energia específica é a quantidade de energia armazenada por unidade de massa. Possui como unidade Wh/kg.

### **Densidade de Energia**

Densidade de energia é a quantidade de energia elétrica armazenada por metro cúbico de volume de bateria. Normalmente tem a unidade de  $\text{Wh/m}^3$ .

### **Potência Específica**

Potência específica é a quantidade de potência obtida por quilograma de bateria, dado em W/kg. Embora as baterias tenham uma potência máxima, não é sensato operá-las em qualquer lugar perto desta potência máxima por mais de alguns segundos, já que não vai durar muito tempo e funcionariam muito ineficientemente. Algumas baterias têm uma energia específica muito boa, mas tem baixa potência específica, o que significa, em termos de veículos elétricos, que podem conduzir o veículo muito lentamente a uma grande distância. Alta potência específica normalmente resulta em baixa energia específica para um determinado tipo de bateria.

## **Eficiência de Ah**

Em um mundo ideal, uma bateria voltaria à carga completa nela colocada, no caso de a eficiência de Ah ser de 100%. No entanto, isso não ocorre na realidade, sua eficiência de carga é inferior a 100%. O valor exato irá variar de acordo com diferentes tipos de bateria, a temperatura e a taxa de carga. Também irá variar de acordo com o estado de carga. Por exemplo, quando a carga está entre 20% e 80%, aproximadamente, a eficiência será geralmente muito próxima de 100%, mas, quando a carga está abaixo de 20%, por exemplo, a eficiência cai significativamente.

## **Eficiência de energia**

A eficiência de energia é outro parâmetro muito importante e é a razão entre a energia elétrica fornecida pela bateria e o valor de energia requerida para recarregar a bateria até a carga inicial antes de descarregar. Um forte argumento para a utilização de veículos elétricos é baseado em seu uso eficiente da energia, com consequente redução das emissões globais, sendo então veículos de alta eficiência energética.

## **Taxa de autodescarga**

Muitas baterias descarregam quando ociosas. Isto é conhecido como autodescarga. Devido a este fato, as baterias não devem ficar por grandes intervalos de tempo sem serem carregadas ou utilizadas. A taxa de autodescarga é um parâmetro importante que mede essa descarga.

## **Geometria da bateria**

Células vêm em muitas formas. Elas são normalmente embaladas em blocos retangulares. Algumas baterias podem ser fornecidas somente com uma geometria fixa. Algumas podem ser fornecidas em uma grande variação de alturas, larguras e comprimentos.

## **Temperatura, aquecimento e arrefecimento de baterias**

Embora a maioria das baterias trabalhe à temperatura ambiente, algumas trabalham a altas temperaturas e necessitam de resfriamento. O desempenho será reduzido com baixas temperaturas em grande parte das baterias, o que é indesejável, porém superado pelo aquecimento da mesma. Durante o projeto, a necessidade de arrefecimento ou aquecimento deve ser levada em consideração pelo projetista.

## **Vida útil da bateria e número de ciclos profundos**

A maioria das baterias recarregáveis será submetida a apenas algumas centenas de ciclos de profundidade para 20% da carga da bateria. No entanto, o número exato depende do tipo de bateria, e também sobre os detalhes da concepção da mesma, e de como ela é usada. Esta é uma característica muito importante em uma especificação de bateria, uma vez que reflete em toda a vida útil dela, que por sua vez reflete nos custos de funcionamento do veículo elétrico.

### **1.4 Conversão Eletromecânica de Energia**

Em sistemas eletromecânicos, a energia é armazenada em campos elétricos e magnéticos. Quando a energia do campo for influenciada pela configuração das partes

mecânicas que delimitam o campo, criam-se forças mecânicas que tendem a mover os elementos mecânicos de forma que a energia seja transmitida do campo para o sistema mecânico.

Em situações onde grandes quantidades de partículas com carga estão se movendo, a Lei da Força de Lorentz é convenientemente escrita em termos da densidade de carga  $\rho$ , medida em unidades de coulombs por metro cúbico, apresentado na equação (1.11).

$$\vec{F} = \rho(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) \quad (1.11)$$

Onde:  $\vec{F}$  é a densidade de força;

$\vec{E}$  é o campo elétrico;

$\vec{v}$  é a velocidade do conjunto de partículas;

$\vec{B}$  é o campo magnético.

O produto  $\rho\vec{v}$  é conhecido como densidade de corrente, e é representado por  $\vec{J}$ , medido em ampère por metro cúbico. Sendo assim, em sistemas puramente magnéticos ( $\vec{E} = 0$ ), a densidade de força do sistema pode ser escrita conforme a equação (1.12).

$$\vec{F} = \vec{J} \times \vec{B} \quad (1.12)$$

No caso de correntes fluindo em meios condutores, a equação (1.12) pode ser usada para encontrar a densidade de força que atua no próprio material. Observe que uma quantidade substancial de física está por trás dessa expressão aparentemente simples, tendo em vista que o mecanismo pelo qual a força é transferida das cargas móveis para o meio condutor é complexo.

Em situações nas quais as forças atuam apenas sobre elementos condutores de corrente de geometria simples, a equação (1.12) é geralmente a maneira mais simples e fácil de calcular as forças atuantes no sistema. Infelizmente, muito poucas situações práticas caem nessa classe. De fato, a maioria dos dispositivos de conversão eletromecânica de energia contém material magnético e, nesses sistemas, as forças atuam diretamente no material magnético e evidentemente não podem ser calculadas a partir da equação (1.12).

Técnicas de cálculo detalhado e localizado de forças que atuam sobre os materiais magnéticos são extremamente complexas e exigem conhecimento detalhado da distribuição

dos campos por toda a estrutura. Felizmente, a maioria dos dispositivos de conversão eletromecânica de energia é constituída tipicamente pela força líquida, ou conjugado, que atua sobre o componente móvel, e raramente é necessário calcular os detalhes da distribuição interna das forças. Por exemplo, em um motor elétrico adequadamente projetado, as características são determinadas pelo conjugado líquido da aceleração que atua sobre o rotor (parte interna e girante do motor), ao passo que as forças associadas, que atuam no sentido de esmagar o deformar o rotor, não apresentam nenhum papel significativo no desempenho do motor e geralmente não são calculadas.

Para se compreender o comportamento das máquinas elétricas, uma imagem física simples pode ser bem útil. Associado à estrutura do rotor, existe um campo magnético produzido por correntes nos enrolamentos do rotor, ou por rotores de ímã permanente. O mesmo ocorre no estator (parte externa e fixa do motor). Pode-se entender cada um deles como sendo um par de polos magnéticos, norte e sul, associados a cada uma das estruturas. Do mesmo modo que a agulha da bússola tenta se alinhar com o campo magnético terrestre, esses dois conjuntos de campos tentam se alinhar surgindo um conjugado proporcional ao deslocamento desde a posição de alinhamento. Assim, em um motor, o campo magnético do estator gira à frente do campo do rotor, puxando-o e realizando trabalho. O oposto é verdadeiro em um gerador, no qual o rotor faz trabalho sobre o estator.

O princípio da conservação da energia afirma que a energia não é criada nem destruída, ela simplesmente muda de forma. Em outras palavras, o fluxo líquido de energia que entra no sistema através de seus limites é igual à soma das taxas de variação, no tempo, da energia armazenada no sistema. Em sistemas eletromecânicos, cujo mecanismo predominante de armazenamento de energia é o campo magnético, pode-se equacionar a transferência de energia como apresentado na equação (1.13).

$$\begin{pmatrix} \textit{Entrada de} \\ \textit{energia a} \\ \textit{partir de} \\ \textit{fontes} \\ \textit{elétricas} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \textit{Saída de} \\ \textit{energia} \\ \textit{mecânica} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \textit{Aumento da} \\ \textit{energia} \\ \textit{armazenada} \\ \textit{no campo} \\ \textit{magnético} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \textit{Energia} \\ \textit{convertida} \\ \textit{em calor} \end{pmatrix} \quad (1.13)$$

Nesses sistemas, a conversão da energia em calor dá-se por mecanismos tais como aquecimento ôhmico, devido ao fluxo de corrente nos enrolamentos dos terminais elétricos, e atrito mecânico, devido ao movimento dos componentes de sistema que formam os terminais mecânicos. Segundo [FITZGERALD, 2006], em geral é possível separar matematicamente os

mecanismos de perdas dos de armazenamento de energia. Em tais casos o dispositivo pode ser representado como sendo um sistema de armazenamento de energia magnética, sem perdas, com terminais elétricos e magnéticos. Os mecanismos de perda podem então ser representados por elementos externos conectados a esses terminais: resistências nos terminais elétricos e amortecedores mecânicos nos terminais mecânicos.

A capacidade de se identificar um sistema de armazenamento de energia magnética sem perdas é a essência do método da energia aqui utilizado. É importante entender que isso é feito matematicamente como parte do processo de modelagem. Naturalmente, não é possível retirar a resistência dos enrolamentos nem o atrito dos mancais. Entretanto, está se fazendo uso do fato de que um modelo, no qual isso é feito, é uma representação válida do sistema físico.

Para um sistema de armazenamento de energia magnética sem perdas tem-se:

$$dW_{elétrico} = dW_{mecânico} + dW_{campo} \quad (1.14)$$

Onde:  $dW_{elétrico} = i d\lambda = ei dt =$  diferencial da entrada de energia elétrica;

$dW_{mecânico} = f_{campo} dx =$  diferencial da saída de energia mecânica;

$dW_{campo} =$  diferencial da variação de energia magnética armazenada.

No modelo,  $i$  é a corrente elétrica, medida em Ampère,  $\lambda$  é o fluxo concatenado no enrolamento (definido com  $\lambda = N\varphi$ , onde  $N$  é o número de espiras do enrolamento e  $\varphi$  é o fluxo magnético no núcleo), medido em Weber,  $e$  é a tensão induzida nos terminais elétricos pela variação magnética armazenada, medida em Volt,  $f_{campo}$  é a força mecânica de saída do sistema, medida em Newtons, e  $x$  é a posição do terminal mecânico (que pode ter diferentes geometrias dependendo do modelo adotado), medida em metros. É através da reação de tensão que o circuito elétrico externo supre potência ao campo de acoplamento magnético, esse, aos terminais mecânicos de saída. Assim, o processo básico de conversão de energia envolve o campo de acoplamento e as suas ações e reações sobre os sistemas elétricos.

A equação (1.14) e a Lei de Faraday da tensão induzida, mostrada na equação (1.15), formam a base do método da energia.

$$e = N \frac{d\varphi}{dt} = \frac{d\lambda}{dt} \quad (1.15)$$

### Determinação da Força e do Conjugado Magnéticos a partir da Energia

Conforme apresentado anteriormente, em um sistema de armazenamento de energia magnética sem perdas, a energia magnética  $W_{campo}$  é uma “função de estado”, determinada unicamente pelos valores das variáveis independentes de estado  $\lambda$  e  $x$ . Pode-se mostrar isso explicitamente reescrevendo a equação (1.14) em termos de suas componentes, conforme apresentado na equação (1.16).

$$dW_{campo}(\lambda, x) = i d\lambda - f_{campo} dx \quad (1.16)$$

Para qualquer função de estado de duas variáveis independentes, por exemplo,  $F(x_1, x_2)$ , a diferencial total de  $F$ , em relação às duas variáveis de estado  $x_1$  e  $x_2$ , pode ser escrita como indicado na equação (1.17).

$$dF(x_1, x_2) = \left. \frac{\delta F}{\delta x_1} \right|_{x_2} dx_1 + \left. \frac{\delta F}{\delta x_2} \right|_{x_1} dx_2 \quad (1.17)$$

É extremamente importante ter em mente que cada uma das derivadas parciais da equação (1.17) é determinada em relação a uma das variáveis de estado, mantendo constante a outra variável.

A equação (1.17) é válida para qualquer função de estado  $F$  e, portanto, também o será para  $W_{campo}$ , conforme escrito na equação (1.18).

$$dW_{campo}(\lambda, x) = \left. \frac{\partial W_{campo}}{\partial \lambda} \right|_x d\lambda + \left. \frac{\partial W_{campo}}{\partial x} \right|_\lambda dx \quad (1.18)$$

Como  $\lambda$  e  $x$  são variáveis independentes, tem-se que:

$$W_{campo}(\lambda_0, x_0) = \int_0^{\lambda_0} i(\lambda, x_0) d\lambda \quad (1.19)$$

Pelo mesmo motivo, as equações (1.16) e (1.18) devem ser iguais para todos os valores de  $d\lambda$  e  $dx$ . Assim, tem-se:

$$i = \left. \frac{\partial W_{campo}(\lambda, x)}{\partial \lambda} \right|_x \quad (1.20)$$

Onde a derivada parcial foi obtida mantendo  $x$  constante. Analogamente, mantendo-se  $\lambda$  constante, tem-se:

$$f_{campo} = \left. \frac{\partial W_{campo}(\lambda, x)}{\partial x} \right|_\lambda \quad (1.21)$$

Observe que manter  $\lambda$  constante é uma exigência puramente matemática e não tem nada a ver com a operação real do dispositivo.

Em sistemas magnéticos lineares  $\lambda = L(x)i$ , onde a indutância  $L$  é função da geometria da estrutura magnética e da permeabilidade do material magnético. Logo, a equação (1.19) fica:

$$W_{campo}(\lambda, x) = \int_0^\lambda i(\lambda', x) d\lambda' = \int_0^\lambda \frac{\lambda'}{L(x)} d\lambda' = \frac{1}{2} \frac{\lambda^2}{L(x)} \quad (1.22)$$

Para estes sistemas, a força pode ser encontrada por substituição direta na equação (1.21), resultando na equação (1.23).

$$f_{campo} = - \left. \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{1}{2} \frac{\lambda^2}{L(x)} \right) \right|_\lambda = \frac{\lambda^2}{2L(x)^2} \frac{dL(x)}{dx} \quad (1.23)$$

Se desejado, agora a força pode ser expressa diretamente em termos da corrente  $i$  simplesmente fazendo a substituição  $\lambda = L(x)i$ , conforme mostrado na equação (1.24).

$$f_{campo} = \frac{i^2}{2} \frac{dL(x)}{dx} \quad (1.24)$$

Por analogia com o desenvolvimento que levou à equação 1.21, pode-se obter o conjugado como sendo o negativo da derivada parcial da energia em relação à  $\theta$  (Posição angular do rotor, medida entre o eixo magnético da bobina do estator e o eixo principal do rotor), mantendo  $\lambda$  constante, conforme a equação (1.25).



$$T_{campo} = - \left. \frac{\partial W_{campo}(\lambda, \theta)}{\partial \theta} \right|_{\lambda} \quad (1.25)$$

Em sistemas magnéticos lineares, para os quais  $\lambda = L(\theta)i$ , por analogia com a equação (1.22), a energia é dada pela equação (1.26).

$$W_{campo}(\lambda, \theta) = \frac{1}{2} \frac{\lambda^2}{L(\theta)} \quad (1.26)$$

Portanto, o conjugado é dado pela equação (1.27) abaixo.

$$T_{campo} = - \left. \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \frac{1}{2} \frac{\lambda^2}{L(\theta)} \right) \right|_{\lambda} = \frac{\lambda^2}{2L(\theta)^2} \frac{dL(\theta)}{d\theta} \quad (1.27)$$

O conjugado da equação (1.27) pode ser expresso indiretamente em termos da corrente  $i$  conforme mostrado na equação (1.28).

$$T_{campo} = \frac{i^2}{2} \frac{dL(\theta)}{d\theta} \quad (1.28)$$

### Determinação da Força e do Conjugado Magnéticos a partir da Coenergia

A escolha da energia ou coenergia como função de estado é puramente uma questão de conveniência. Ambas fornecem o mesmo resultado, mas uma ou outra pode ser analiticamente mais simples, dependendo do resultado desejado e das características do sistema analisado.

A coenergia  $W'_{campo}$  é definida como uma função de  $i$  e  $x$  tal que:

$$W'_{campo}(i, x) = i\lambda - W_{campo}(\lambda, x) \quad (1.29)$$

Derivando a equação (1.29) tem-se:

$$dW'_{campo}(i, x) = \lambda di - dW_{campo}(\lambda, x) \quad (1.30)$$

Usando a diferencial da equação (1.16), tem-se:

$$dW'_{campo}(i, x) = \lambda di + f_{campo} dx \quad (1.31)$$

Como  $W'_{campo}$  é definida como uma função de  $i$  e  $x$ , sua diferencial pode ser expressa conforme a equação (1.32).

$$dW'_{campo}(i, x) = \left. \frac{\partial W'_{campo}}{\partial i} \right|_x di + \left. \frac{\partial W'_{campo}}{\partial x} \right|_i dx \quad (1.32)$$

As equações (1.31) e (1.32) devem ser iguais para todos os valores de  $di$  e  $dx$ , logo:

$$\lambda = \left. \frac{\partial W'_{campo}(i, x)}{\partial i} \right|_x \quad (1.33)$$

e

$$f_{campo} = \left. \frac{\partial W'_{campo}(i, x)}{\partial x} \right|_i \quad (1.34)$$

Em analogia com a dedução da equação (1.18), a coenergia pode ser calculada da integral de  $\lambda di$ , como mostrado na equação (1.35).

$$W'_{campo}(i, x) = \int_0^i \lambda(i', x) di' \quad (1.35)$$

Em sistemas magnéticos lineares para os quais  $\lambda = L(x)i$ , portanto, a coenergia é dada pela equação (1.36).

$$W'_{campo}(i, x) = \frac{1}{2} L(x) i^2 \quad (1.36)$$

A força pode ser encontrada a partir da equação (1.34) como:

$$f_{campo} = \frac{i^2}{2} \frac{dL(x)}{dx} \quad (1.37)$$

Como esperado, a equação (1.37) é idêntica a equação (1.24).

Do mesmo modo, em um sistema com deslocamento mecânico rotacional, a coenergia pode ser expressa em termos da corrente e do deslocamento angular  $\theta$ , conforme mostrado na equação (1.38).

$$W'_{campo}(i, \theta) = \int_0^i \lambda(i', \theta) di' \quad (1.38)$$

E o conjugado, conforme a equação (1.39).

$$T_{campo} = \left. \frac{\partial W'_{campo}(i, \theta)}{\partial \theta} \right|_i \quad (1.39)$$

Se o sistema for magneticamente linear, tem-se que:

$$W'_{campo}(i, \theta) = \frac{1}{2} L(\theta) i^2 \quad (1.40)$$

e

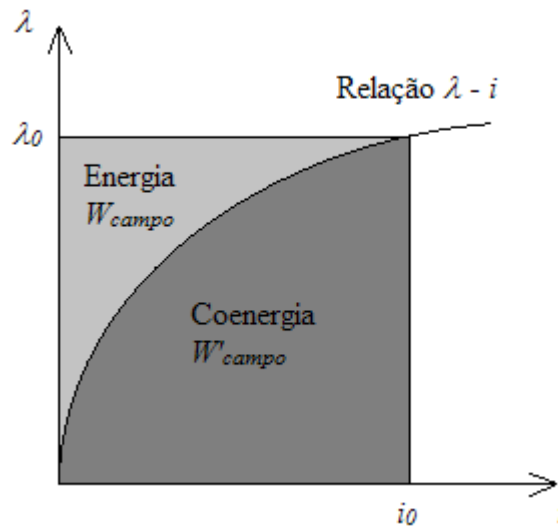
$$T_{campo} = \frac{i^2}{2} \frac{dL(\theta)}{d\theta} \quad (1.41)$$

Como esperado, a equação (1.41) é idêntica a equação (1.28).

Em alguns casos, as representações de circuitos magnéticos podem ser difíceis de se obter ou podem não fornecer solução com a exatidão desejada. Frequentemente, tais situações caracterizam-se por geometrias complexas e/ou materiais magnéticos em saturação profunda. Nessas situações, técnicas numéricas podem ser utilizadas para se calcular a energia do sistema ou a coenergia. Uma dessas técnicas, conhecida como “método dos elementos finitos”, tornou-se largamente usada. Por exemplo, esses programas, disponibilizados comercialmente por diversos fornecedores, podem ser usados para calcular as coenergias correspondentes a diversos valores do deslocamento  $x$  de um atuador de deslocamento linear,

assegurando-se de manter constante a corrente quando o valor de  $x$  é variado. A força então pode ser obtida da equação (1.34), calculando-se numericamente a derivada da coenergia a partir dos resultados de elementos finitos.

Figura 1.4 – Interpretação gráfica da energia e da coenergia



Fonte: [FITZGERALD, 2006] (adaptado pelo autor, 2015).

Em um sistema magnético linear, a energia e a coenergia são numericamente iguais ( $\frac{1}{2}\lambda^2/L = \frac{1}{2}Li^2$ ). Em um sistema não-linear, no qual  $\lambda$  e  $i$  não são linearmente proporcionais, as duas funções não são nem mesmo numericamente iguais. Uma interpretação gráfica da energia e da coenergia em um sistema não-linear está mostrada na Figura 1.4. A área entre a curva  $\lambda - i$  e o eixo vertical, igual à integral de  $i d\lambda$ , é a energia. A área até o eixo horizontal, dada pela integral de  $\lambda di$ , é a coenergia. Nesse sistema de excitação única, a equação (1.42) apresenta a soma da energia com a coenergia.

$$W_{campo}(\lambda, x) + W'_{campo}(i, x) = i\lambda \quad (1.42)$$

A força produzida por um campo magnético para um valor de  $x$  e  $i$  ou  $\lambda$ , não pode naturalmente depender de se é calculado a partir da energia ou da coenergia. Ambos os métodos fornecem o mesmo resultado.

## 1.5 Veículos Elétricos

Veículos elétricos são o futuro do setor de transportes e a última barreira da eletricidade. As inúmeras vantagens dos VEs frente aos VCIs os tornam a melhor forma de transportar pessoas e cargas no modal rodoviário. Ao longo deste trabalho são mostrados os principais benefícios da utilização de VEs, sendo a simplicidade do seu sistema de propulsão, o seu baixo custo de reabastecimento e sua relevância às propostas de redução de emissões e poluição em geral, comparados aos tradicionais VCIs, seus maiores aliados para a aceitação e inclusão destes veículos pela sociedade. Existem efetivamente seis tipos de veículos elétricos:

- a) Os tradicionais veículos elétricos à bateria (foco deste trabalho);
- b) Os veículos elétricos híbridos (série, paralelo e extensor de autonomia);
- c) Os veículos elétricos que usam combustíveis substituíveis como fonte de energia (células combustíveis ou baterias de metal);
- d) Os veículos elétricos alimentados pela rede elétrica;
- e) Os veículos elétricos que usam energia diretamente da radiação solar;
- f) Os veículos que armazenam energia por meios alternativos (“volantes” ou supercapacitores).

### Veículos Elétricos à Bateria

Segundo [LARMINIE, 2003], O veículo elétrico à bateria (VEB) é o veículo que consiste basicamente de uma bateria, um motor elétrico e um controlador. As baterias são normalmente recarregáveis por meios elétricos via um *plug* e uma unidade de carregamento de bateria que tanto pode ser interna ao veículo quanto adaptada no ponto de carregamento. O controlador normalmente controlará o suprimento de energia para o motor e, conseqüentemente, a velocidade do veículo, em frente e em reverso. Este é normalmente conhecido como o controlador de 2 quadrantes, para frente e para trás. Ele é normalmente desejado para uso em frenagem regenerativa para conservar energia e como uma forma conveniente de frenagem sem atrito. Quando o controlador permite frenagem regenerativa para frente e para trás ele é conhecido como controlador de 4 quadrantes.

O fluxo de energia em um veículo elétrico à bateria foi apresentado em detalhes no esquema da Figura 1.3, onde foram incluídas as perdas ao longo do sistema de propulsão. Embora a Figura 1.3 trate do fluxo de energia em um VEB, este esquema é a base para todos os outros tipos de veículos elétricos. O que falta ser mencionado é que, os veículos elétricos possuem a vantagem de poder recuperar parte da energia gasta em sua propulsão. Essa energia pode ser recuperada durante a frenagem ou a qualquer momento que o mesmo esteja em movimento sem o acionamento do pedal acelerador, é o chamada “Sistema de Regeneração de Energia” ou, simplesmente, “Frenagem Regenerativa”. De acordo com pesquisas realizadas no LSPV / UERJ, existem sistemas de frenagem regenerativa que conseguem recuperar cerca de 40 % da energia gasta na propulsão, como ocorre com o Nissan Leaf, por exemplo. Além disso, já existem pesquisas que visam aprimorar este sistema. Segundo [COSTA, 2014], a Ford e a Samsung, por exemplo, anunciaram em 2014 o desenvolvimento de um novo sistema de bateria capaz de recuperar 95 % da energia gasta na frenagem.

A frenagem regenerativa aumenta a autonomia do veículo e, conseqüentemente, sua eficiência. Um sistema de regeneração de energia é impossível em um VCI, pois um motor à combustão interna não pode operar em sentido reverso para transformar energia cinética em combustível. Essa é uma característica peculiar dos veículos elétricos, principalmente os VEBs que possuem um banco de baterias maior. Nestes veículos o motor é um conversor eletromecânico de energia capaz de operar tanto à frente, transformando energia elétrica em energia cinética para impulsionar o veículo, quanto em reverso, transformando energia cinética em energia elétrica para carregar a bateria.

Existe uma gama de veículos deste tipo no mercado para diferentes aplicações, como por exemplo: Bicicletas e triciclos elétricos, carrinhos de golfe e outros. Existe ainda uma gama de tamanhos de veículos elétricos, que inclui carros, caminhões e ônibus.

### **O Veículo Elétrico Híbrido**

O veículo elétrico híbrido (VEH) tem duas ou mais fontes de energia e tem um grande número de possíveis variações. O tipo mais comum combina um motor à combustão interna com uma bateria e um motor elétrico.

Existem três arranjos básicos para veículos híbridos, o Veículo Elétrico Híbrido Série (VEHS), o Veículo Elétrico Híbrido Paralelo (VEHP) e o Veículo Elétrico Híbrido Extensor de Autonomia (VEHEA<sup>1</sup>).

O VEHP é movimentado por um ou mais motores elétricos, supridos pela bateria ou pelo motor a combustão interna acionando uma unidade geradora, ou por ambos. Em ambos os casos, a força motriz vem inteiramente do(s) motor(es) elétrico(s). Já o VEHP pode ser movido pelo motor à combustão interna, trabalhando diretamente através de um sistema de transmissão para as rodas, ou por um ou mais motores elétricos, ou por ambos simultaneamente. E o recente VEHEA é movido por um ou mais motores elétricos supridos exclusivamente pela bateria, que tem sua autonomia estendida pela adição de energia oriunda de um motor à combustão interna acoplado a um gerador elétrico.

Em ambos os arranjos, suas baterias são recarregadas pelo conjunto motor/gerador enquanto os veículos se movem, assim o banco de baterias não precisa ser tão grande quanto o dos veículos puramente elétricos à bateria. Também, ambos os tipos permitem a frenagem regenerativa para o motor trabalhar como gerador desacelerando o veículo e, simultaneamente, carregando a bateria.

A principal desvantagem dos híbridos série e dos extensores de autonomia é que toda a energia fornecida pelo motor à combustão precisa passar por um gerador para ser convertida em energia elétrica, isso aumenta consideravelmente o custo de tal sistema. Já os híbridos paralelos são mais baratos por não terem que converter a energia oriunda da combustão, além disso, seus motores são menores, e assim, possuem uma gama de aplicação ampla.

Um veículo híbrido paralelo pode combinar o uso do motor à combustão interna e das baterias, a fim de otimizar continuamente a eficiência do motor à combustão interna. Além disso, este tipo de veículo elétrico pode usar apenas a bateria para entregar a energia necessária à propulsão, que é bastante útil em centros urbanos onde as velocidades são menores, evitando assim a emissão de poluentes. Ou ainda, pode ser usado apenas o motor à combustão para tracionar o veículo no caso de longas viagens, por exemplo.

Em veículos híbridos paralelos é comum definir uma variável chamada “Grau De Híbridização”, cujo cálculo é mostrado na equação 1.43.

$$GDH = \frac{\textit{energia do motor elétrico}}{\textit{energia do motor elétrico} + \textit{energia do motor à combustão}} \quad (1.43)$$

Quanto maior o grau de hibridização (GDH) maior a possibilidade de usar um motor à combustão interna menor, e terá sua operação próxima da eficiência ótima.

Devido à possibilidade de veículos híbridos se moverem, embora por um curto tempo, com o motor à combustão interna desligado e inteiramente por meio da energia da bateria, ele pode ser chamado “veículo de emissão parcialmente zero” (VEPZ).

Mais arranjos de veículos híbridos tornam-se evidente quando notamos que, em todos os arranjos, a bateria poderia ser carregada por uma fonte elétrica separada, como a rede elétrica, enquanto o veículo não estiver em uso. Esta aplicação seria útil apenas se uma grande bateria for usada, desta forma, esta configuração concederia ao veículo considerável alcance utilizando apenas a bateria. Este é o chamado veículo elétrico híbrido plug-in (VEH Plug-in).

### **Veículos Elétricos à Combustível**

Embora tenha sido inventada por volta de 1840, a célula a combustível não é uma tecnologia familiar para muitas pessoas. A maior questão com as células combustíveis é que, geralmente, elas requerem hidrogênio como combustível. Ele pode ser armazenado a bordo, embora isso não seja fácil. Uma forma alternativa é extrair o hidrogênio de um combustível, como o metanol.

Veículos de serviços públicos, tais como ônibus, podem usar novos combustíveis como o hidrogênio mais convenientemente porque eles abastecem em um único lugar. Ônibus são aplicações primitivas muito promissoras de células a combustíveis.

Baterias de metal são variações em células a combustíveis. Elas são reabastecidas por substituição dos eletrodos de metal que podem ser reciclados. Baterias de zinco são particularmente promissoras nesta classe.

### **Veículos Elétricos Alimentados pela Rede Elétrica**

Tanto os trólebus quanto os bondes são conhecidos, e já foram amplamente utilizados como meios de transporte. Eles são uma forma de emissão zero de transporte urbano que ainda é usado em algumas cidades. Normalmente a eletricidade é fornecida diretamente pelas



redes aéreas. Uma pequena bateria é usada no trólebus para permitir uma quantidade limitada de energia sem o uso de linhas para abastecimento.

O critério mais importante adotada na época para a retirada de circulação de trólebus e bondes foi o custo, não as considerações ambientais e preocupações sobre gases de efeito estufa. Combustíveis fósseis eram baratos e fios aéreos eram considerados “sem graça”, inflexíveis, caros e um fardo de manutenção. Hoje, quando os veículos à combustão interna estão poluindo as cidades, os critérios mudaram novamente. Os veículos elétricos alimentados diretamente por redes elétricas poderiam ter um efeito útil no transporte moderno.

Existe atualmente um veículo elétrico muito conhecido alimentado diretamente pela rede elétrica e utilizado como meio de transporte por muitas pessoas, é o trem urbano. Este veículo tem a vantagem de poder transportar uma quantidade maior de pessoas quando comparado aos trólebus e aos bondes, são ditos “transportes de massa”. Outra vantagem desses trens é o fato de sua locomoção ser independente das condições do tráfego dos centros urbanos, uma vez que trafegam por vias exclusivas separadas dos demais meios de transporte, as vias férreas.

### **Veículos Elétricos à Energia Solar**

Veículos movidos à energia solar são caros e só funcionam efetivamente em áreas de sol a pino. Embora hoje seja improvável que um carro dessa natureza venha a se tornar um veículo para uso diário, a eficiência de células solares fotovoltaicas está aumentando o tempo todo enquanto o seu custo está diminuindo. O conceito de utilização de células solares é uma ideia perfeitamente viável e, como o custo cai e a eficiência aumenta, talvez um dia possa ser factível.

### **Veículos Elétricos que Usam Volantes ou Supercapacitores**

Existem vários dispositivos de armazenamento de energia alternativos, incluindo os volantes e os supercapacitores. Como regra geral, ambos os dispositivos têm altas potências específicas, o que significa que eles podem armazenar e fornecer a energia rapidamente. No

entanto, a quantidade de energia que eles podem armazenar atualmente é muito pequena. Em outras palavras, embora tenham uma boa densidade de potência, eles têm uma baixa densidade de energia.

Um veículo elétrico usando um volante como um dispositivo de armazenamento de energia foi projetado por John Parry, no Reino Unido. O veículo era essencialmente um bonde em que o volante é acelerado por um motor elétrico. A potência para isto era fornecida quando o bonde descansa enquanto pega os passageiros em uma de suas estações frequentes. O bonde era conduzido a partir do volante por um cone infinitamente variável e caixa de velocidades bola. O bonde era desacelerado usando a caixa de velocidades para acelerar o volante e, conseqüentemente, transfere a energia cinética do veículo para a energia cinética do volante, uma forma eficiente de frenagem regenerativa. O inventor propôs montagem tanto do volante quanto da caixa de velocidades para um VEB. A vantagem disto é que baterias não assumem e entregam energia rapidamente, enquanto que um volante pode. Em segundo lugar, o arranjo pode ser feito para dar uma eficiência de regeneração razoavelmente alta, o que ajudará a reduzir a massa das baterias.

Veículos experimentais utilizando supercapacitores para armazenar energia, também foram testados, normalmente eles são usados como parte de um veículo híbrido. A principal fonte de energia pode ser um motor à combustão interna ou pode ser uma célula combustível.

Armazenadores de energia, tais como supercapacitores e volantes podem ser utilizados numa vasta gama de híbridos. Os meios de alimentação que podem ser usados em veículos híbridos incluem baterias recarregáveis, baterias abastecidas ou células a combustível, energia solar, motores à combustão interna, redes elétricas, volantes e supercapacitores. Quaisquer dois ou mais destes podem ser utilizados em conjunto para formar um veículo elétrico híbrido, dando mais de 21 combinações. Se três ou mais fontes de energia são combinadas existem mais de 35 combinações. Certamente há muito espaço para a imaginação no uso de combinações híbridas.

### **1.5.1 Veículos Elétricos de Referência**

Neste trabalho serão apresentados os ensaios de trajeto e de recarga realizados no LSPV / UERJ, que culminaram na elaboração da metodologia proposta.

Dois veículos elétricos foram usados nesses ensaios, são eles:

- a) O carro Palio Weekend Elétrico, montado pela Itaipu Binacional através de acordo de cooperação tecnológica com a KWO – Kraftwerke Oberhasli AG da Suíça e em parceria com a FIAT do Brasil;
- b) A bicicleta elétrica da marca LEV modelo E-BIKE S, cedida pela Ampla Energia e Serviços S.A.

Estes veículos atualmente fazem parte da frota da Cidade Inteligente Búzios.

Como não existem bicicletas à combustão interna para fins de comparação com as bicicletas elétricas (desconsidera-se aquelas bicicletas com motores de combustão interna adaptados), não houve necessidade de conhecer todas as características de desempenho da bicicleta. Entretanto, no caso do Palio Weekend Elétrico é primordial conhecer tais características, para que estas possam ser comparadas às dos VCIs.

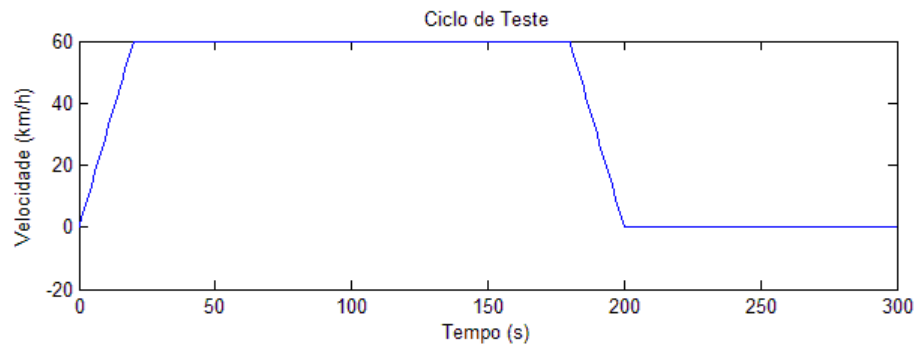
Sendo assim, realizou-se uma simulação de desempenho do Palio Weekend Elétrico, onde, para isso, foram executados os seguintes passos:

- a) Escolha do ciclo de condução base – Gráfico;
- b) Cálculo da força instantânea de tração para o ciclo de condução – Gráfico;
- c) Cálculo da potência instantânea de tração a partir da força instantânea e do ciclo de condução – Gráfico;
- d) Cálculo da potência para dimensionamento dos motores.

As etapas a), b) e c) são comuns tanto para dimensionamento de motores para VCIs quanto para dimensionamento de motores para VEs. Já a etapa d) difere para VCIs e VEs.

Para esta simulação de desempenho utilizou-se a ferramenta computacional MATLAB. O ciclo de condução, ou ciclo de teste, escolhido como base é o SAE-J227. A Figura 1.5 apresenta o comportamento da velocidade segundo o ciclo adotado.

Figura 1.5 – Ciclo de condução baseado no ciclo SAE-J227



Fonte: O autor, 2015.

Como se pode observar, o ciclo de condução da Figura 1.5 consta de uma aceleração inicial constante de 0 a 60 km/h, um período de velocidade constante de 60 km/h, uma desaceleração constante de módulo igual à aceleração do início do ciclo e um período de velocidade zero, simulando o veículo parado. O gráfico da Figura 1.5 simula uma condução básica em centro urbano, onde o motorista acelera até uma velocidade máxima permitida de 60 km/h e mantém esta velocidade até avistar um semáforo, onde então desacelera o veículo até parar e esperar o sinal abrir, reiniciando assim o ciclo.

De acordo com o gráfico da Figura 1.5, para o veículo elétrico, o período de tempo em que o sistema de propulsão é acionado através do pedal do acelerador, gastando assim parte da energia da bateria do veículo, pertence exclusivamente ao intervalo de 0 a 180 segundos, ou seja, neste ciclo de condução, a bateria só fornece energia para o veículo nos primeiros 3 minutos. Nos 2 minutos posteriores (frenagem e parado), o sistema de propulsão do veículo elétrico não é exigido, logo, nenhuma energia da bateria é consumida. Esta é uma característica peculiar dos sistemas de propulsão veicular elétrica, pois em sistemas de propulsão veicular à combustão, o combustível (energia) é gasto durante todo o ciclo.

Para o cálculo e construção do gráfico da força instantânea de tração durante todo o ciclo de condução da Figura 1.5 foram utilizadas as equações de força (1.44) a (1.48), segundo [LARMINIE, 2003], apresentadas a seguir:

a) Força de resistência ao rolamento ( $F_{rr}$ ):

$$F_{rr} = \mu_{rr} \cdot m \cdot g \quad (1.44)$$

b) Força de arrasto aerodinâmico ( $F_{ad}$ ):

$$F_{ad} = \frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot C_d \cdot v^2 \quad (1.45)$$

c) Força de subida ( $F_{hc}$ ):

$$F_{hc} = m \cdot g \cdot \text{sen } \varphi \quad (1.46)$$

d) Força de aceleração linear ( $F_{la}$ ):

$$F_{la} = m \cdot a \quad (1.47)$$

e) Força de aceleração angular ( $F_{wa}$ ):

$$F_{wa} = I \frac{G^2}{n_g \cdot r^2} a \quad (1.48)$$

Onde:  $\mu_{rr}$  é o coeficiente de resistência ao rolamento;

$m$  é a massa do veículo;

$g$  é o módulo da aceleração da gravidade;

$\rho$  é a densidade do ar;

$A$  é a área frontal do veículo;

$C_d$  é o coeficiente de arrasto aerodinâmico do veículo;

$v$  é a velocidade instantânea do veículo;

$\varphi$  é o ângulo de inclinação da estrada;

$a$  é o módulo da aceleração instantânea do veículo;

$G$  é a relação de transmissão do sistema conectado ao motor através do eixo;

$n_g$  é a eficiência do sistema de transmissão;

$r$  é o raio do pneu; e

$I$  é o momento de inércia do motor;

Para o cálculo dessas forças, foram utilizados dados da ficha técnica do Palio Weekend Elétrico, disponibilizados no portal da empresa Itaipu Binacional, e valores típicos para as variáveis desconhecidas, conforme Tabela 1.3.

Tabela 1.3 – Valores das variáveis das forças que compõem a força total de tração

Variáveis	Valores
$\mu_{rr}$	0,005
$M$	1690 kg
$G$	9,8 m/s <sup>2</sup>
$P$	1,25 kg/m <sup>3</sup>
$A$	2,465 m <sup>2</sup>
$C_d$	0,32
$V$	27,78 m/s (100 km/h)
$\Phi$	0,0663 rad (3,8°)
$A$	1,85 m/s <sup>2</sup> (0 a 60 km/h em 9 s)
$G$	12
$n_g$	0,95
$R$	0,29 m
$I$	0,025 kg/m <sup>2</sup>

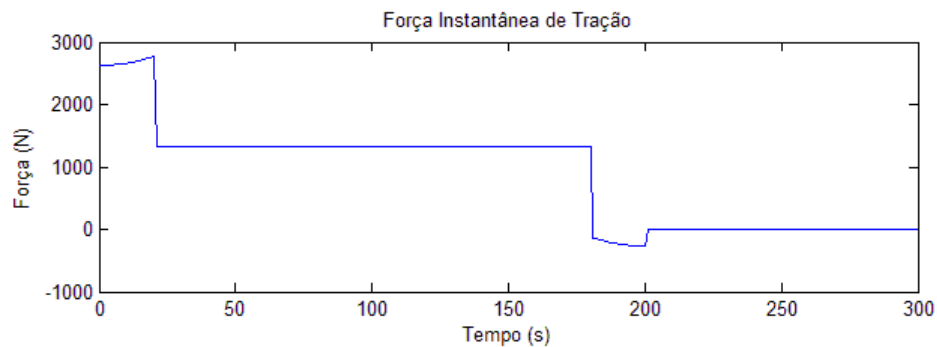
Fonte: LARMINIE,2003; ITAIPU BINACIONAL (<https://www.itaipu.gov.br/sala-de-imprensa/itaipunamidia/testada-e-aprovada-palio-weekend-100-eletrica?page=3>), 2009.

O esforço total, ou força total de tração ( $F_{te}$ ), é dado pela soma das equações (1.44) à (1.48). Logo, tem-se:

$$F_{te} = F_{rr} + F_{ad} + F_{hc} + F_{la} + F_{wa} \quad (1.49)$$

Como mostrado na Figura 1.5, a aceleração do veículo varia durante todo o ciclo de condução, logo a força de tração será variável. A Figura 1.6 mostra o comportamento da força instantânea de tração durante todo o ciclo de condução.

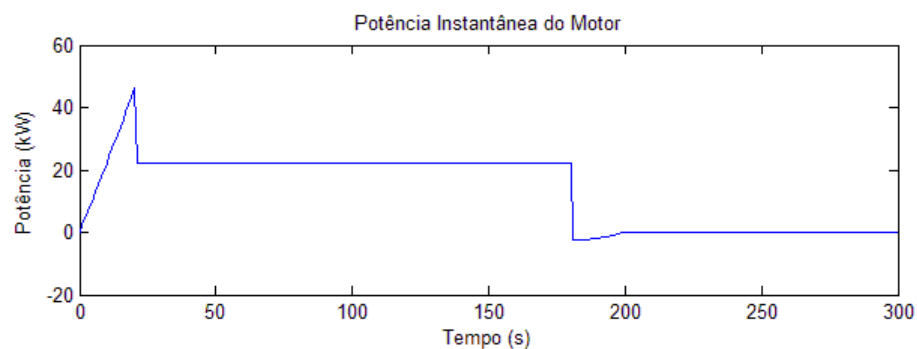
Figura 1.6 – Força de tração durante o ciclo de condução



Fonte: O autor, 2015.

Em seguida, é feito o cálculo da potência instantânea do motor durante o ciclo de condução. A potência é calculada multiplicando a força de tração ( $F_{te}$ ) pela velocidade do veículo ( $v$ ) durante todo o ciclo de teste, em outras palavras, é como multiplicar o gráfico da Figura 1.6 pelo da Figura 1.5. O resultado, então, é apresentado na Figura 1.7.

Figura 1.7 – Potência do motor durante o ciclo de condução



Fonte: O autor, 2015.

De posse da Figura 1.7, é possível obter o valor da potência de dimensionamento do motor de um VCI para que ele possa suportar as condições do ciclo de teste simulado. Os motores dos VCIs são dimensionados para a máxima potência requerida, que neste caso é de 46 kW. No entanto, no caso dos VEs, o dimensionamento dos motores é feito através da equação (1.50).

$$P_{Motor\ El\u00e9trico} = \sqrt{\frac{P_1^2 t_1 + P_2^2 t_2 + P_3^2 t_3 + \dots + P_n^2 t_n}{t_1 + t_2 + t_3 + \dots + t_n}} \quad (1.50)$$

Onde:  $P_n$  é a potência no ponto  $n$  do gráfico da Figura 1.7; e

$t_n$  é o instante de tempo no ponto  $n$  do gráfico da Figura 1.7.

Substituindo os valores, o valor da potência de dimensionamento do motor do Palio Weekend Elétrico para que ele possa suportar as condições do ciclo de teste simulado é de 22 kW, este valor está coerente com os dados da ficha técnica do Palio Weekend que apresenta o valor de 15 kW para potência nominal do motor e 28 kW para potência máxima. Nota-se que, para suportar as condições simuladas no ciclo de condução, o Palio Weekend precisa de um motor elétrico com aproximadamente metade da potência nominal do motor de combustão interna que um VCI necessita para suportar as mesmas condições. A explicação para isso é que os motores elétricos podem trabalhar, por algum tempo, com potência acima da nominal sem que haja superaquecimento, e conseqüentemente danos. Algo impossível em um motor de combustão interna!

De acordo com [PECORELLI PERES, 2007], em função da escassez de informações sobre testes específicos em veículos elétricos, há incertezas com relação aos efeitos da introdução destes veículos. Para mitigar estas incertezas, alguns ensaios são necessários, de forma a possibilitar uma avaliação do desempenho dos veículos elétricos, segundo alguns indicadores selecionados, tais como: o rendimento (kWh/km ou MJ/km), a autonomia (km), o tempo médio de recarga da bateria e os estados de carga da bateria. O desempenho de um veículo elétrico também depende de uma variedade de fatores externos e das interações entre eles, tais como a distância percorrida, o tipo de percurso e o peso transportado.

## 1.6 Simulações de Sistemas de Natureza Aleatória

Ao se abordar este assunto, é preciso alicerçá-lo com base nos axiomas, corolários e teoremas dos quais decorrem as propriedades da teoria das probabilidades, observando-se o rigor matemático das questões envolvidas [FREUND, c1965; PAPOULIS, c2002]. No texto seguinte, foi dada ênfase a alguns conceitos e relações consideradas importantes, buscando-se, com isso, ordenar as ideias e fixar as definições necessárias à metodologia de simulação que se pretende descrever.

Portanto, ao dar início a esta parte, é interessante começar pelos sistemas aleatórios, devido à sua ampla ligação com a atuação dos VEs em um centro urbano. A seqüência dos



seus eventos não é conhecida. Uma variável que represente o resultado de um processo aleatório é dita, então, aleatória. É o caso, por exemplo, da escolha do momento de início da recarga dos VEs pelos seus usuários. Ainda que a sequência dos valores assumidos pelas variáveis aleatórias não seja conhecida, a faixa destes valores e a probabilidade com a qual eles ocorrem pode ser conhecida, ou assumida. Desta forma, as variáveis aleatórias são, portanto, apresentadas em termos de funções que descrevem a probabilidade dessas assumirem diversos valores. Esta noção é concebida, originariamente, com qualquer função que associe a cada elemento de um espaço amostral um número real, entendendo-se este espaço, como sendo o conjunto de todos os resultados de um experimento aleatório. Ao se lidar com sistemas que possuam interações aleatórias, é conhecida a ideia de experimento, que traduz um modo de proceder bem compreendido, do qual pode ser observado o seu resultado, porém, este último não se sabe a priori. Sempre que o espaço amostral consistir de resultados contáveis é chamado de espaço amostral discreto. O contrário será um espaço amostral contínuo, sem que haja ambiguidade do emprego das palavras discreto e contínuo quando empregadas para a designação de sistemas. Um evento é qualquer subconjunto do espaço amostral. Quando o resultado de um experimento torna-se conhecido, diz-se que houve a ocorrência de um evento específico se o resultado observado estiver contido no subconjunto ao qual pertence aquele evento.

Segundo [PECORELLI PERES, 2000a], eventos podem ser descritos por palavras. Formalmente, a Teoria dos Conjuntos permite manipulá-los e realizar operações com os mesmos. Ao se classificar os eventos, é fundamental identificá-los. Um par qualquer de eventos que possua uma interseção vazia, da qual decorre a impossibilidade da ocorrência de ambos, corresponde ao chamado eventos disjuntos, mutuamente exclusivos ou, de forma mais simples, excludentes. Determinadas hipóteses com as quais são elaboradas as soluções dos problemas condicionam as variáveis envolvidas em um comportamento específico. Ao se admitir que um VE seja recarregado apenas uma vez por dia, isto faz com que os momentos escolhidos pelos usuários para dar início à recarga das baterias sejam entendidos como mutuamente exclusivos. Outra classificação, não menos importante, consiste na independência de um par de eventos, isto é, a ocorrência de um desses eventos não tem efeito sobre a probabilidade de ocorrência do outro. Aqui, também este conceito apresenta-se ligado a questão dos VEs atuando em uma área urbana. São desconhecidos antecipadamente os trajetos que estes veículos percorrerão ao longo de um dia. Não há evidência de que as distâncias percorridas por estes VEs possam influenciar nos horários de início da recarga. Neste sentido, pode-se então tratar estes eventos como independentes. Matematicamente,

estas classificações remetem à probabilidade  $p$  de ocorrência de dois eventos  $e_1$  e  $e_2$  apresentada na equação (1.51) se mutuamente exclusivos e na (1.52) se independentes:

$$p(e_1 \cup e_2) = p(e_1) + p(e_2) \quad (1.51)$$

$$p(e_1 \cap e_2) = p(e_1) \cdot p(e_2) \quad (1.52)$$

A simulação computacional de sistemas que incluem variáveis aleatórias se apoia no tratamento discreto que lhes é dado, mesmo quando são de comportamento originalmente contínuo, como acontece com as variáveis descritas a respeito dos VEs.

Sendo assim, o conjunto de números  $p_i$  ( $i = 1, 2, 3, \dots, n$ ) é, então, uma função de probabilidade discreta, onde  $p_i$  é a probabilidade de uma variável aleatória  $x_i$  ocorrer. Pelo fato de que a variável deve sempre assumir um dos valores  $p_i$ , segue que:

$$\sum_{i=1}^n p_i = 1 \quad (1.53)$$

Em um sistema que apresenta variáveis aleatórias contínuas, um número infinito e não enumerável de possíveis valores poderá ser assumido por estas variáveis. Logicamente, neste caso, a probabilidade de ocorrência de qualquer um destes valores deve ser considerada nula. Para se descrever a variável aleatória contínua, define-se a “função densidade de probabilidade”  $f(x)$ . A probabilidade de se assumir um valor entre  $x_1$  e  $x_2$  é dada por:

$$\int_{x_1}^{x_2} f(x) dx \quad f(x) \geq 0 \quad (1.54)$$

É intrínseca a esta definição que:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f(x) dx = 1 \quad (1.55)$$

Esta última consiste na função de distribuição cumulativa que define a probabilidade de um valor observado, seja menor ou igual a  $x$ . Denominando-se esta função de  $F(x)$ , tem-se:

$$F(x) = \int_{-\infty}^x f(x)dx \quad (1.56)$$

Portanto, de acordo com (1.56), pode-se afirmar que:

$$0 \leq F(x) \leq 1 \quad \forall x \quad (1.57)$$

$$p(x_1 \leq x \leq x_2) = F(x_2) - F(x_1) \quad (1.58)$$

Uma observação que normalmente se faz é que o valor da função densidade de probabilidade em qualquer dos seus pontos não é uma probabilidade. O único meio de se obter a probabilidade a partir desta função é integrando-a, de acordo com (1.54). Outra questão também envolvendo a equação (1.54) é que seria impossível que a probabilidade de ocorrência de uma variável aleatória  $x$ , contida entre os valores  $x_1$  e  $x_2$ , fosse negativa. Este argumento é considerado válido para afirmar que  $f(x)$  é não negativa em qualquer ponto, resultando em (1.59):

$$f(x) \geq 0 \quad \forall x \quad (1.59)$$

Ainda que, conforme mencionado,  $f(x)$  não seja uma probabilidade, é extremamente útil em muitas aplicações. Em simulações costuma-se considerar a notação  $f(x)dx$  como representando o valor da probabilidade de uma variável aleatória igual a  $x$ . O termo  $dx$  da expressão é assumido como um intervalo ( $x_1 \leq x \leq x_2$ ) de amplitude infinitesimal, de tal forma que o produto  $f(x)dx$ , de uma maneira aproximada, possa ser visto como uma área sob a curva  $f(x)$ , isto é, uma “probabilidade”, de acordo com (1.54). Aderiu-se a este expediente, em termos de variáveis discretas nos cálculos empregados para simular a atuação dos VEs.

Como nos procedimentos de simulação digital, o conceito de variável aleatória contínua é assimilado em termos de variáveis aleatórias discretas e, frequentemente, a função de distribuição cumulativa é estimada de uma série de observações. Nestas circunstâncias, as observações são contadas indicando-se o número de vezes que uma variável ocorreu, em um certo intervalo pré-definido. A função de probabilidade é, então, obtida com base nestas observações. A maneira comum de organizar os dados obtidos consiste em apresentá-los na forma tabular, como uma “distribuição de frequências”, a qual apresenta o número de vezes que a variável ocorre nos diferentes intervalos. Associa-se a estas informações o cálculo da

“distribuição de frequências relativas”, onde o número de observações, para cada um dos intervalos, é dividido pelo seu total.

Da definição de distribuição de frequências relativas, conclui-se que a soma de todos os seus valores deve ser igual à unidade. É importante, entretanto, notar que esta distribuição, não é necessariamente a função densidade de probabilidade da variável aleatória. Se os  $n$  intervalos para os quais a distribuição de frequências foi gerada são  $x_i \leq x \leq x_{i+1}$  e  $p_i$ , para  $i = 1, 2, 3, \dots, n$ , deve ser interpretada como a integral da função densidade de probabilidade nos intervalos citados, conforme a equação (1.60):

$$p_i = \int_{x_i}^{x_{i+1}} f(x) dx \quad (1.60)$$

Verifica-se, portanto, que a frequência relativa permite exprimir os valores com os quais se obtém a função de distribuição cumulativa ao se tratar com as variáveis discretas. Os valores tabulados da variável aleatória determinam a função densidade de probabilidade, em cada intervalo, pela seguinte relação:

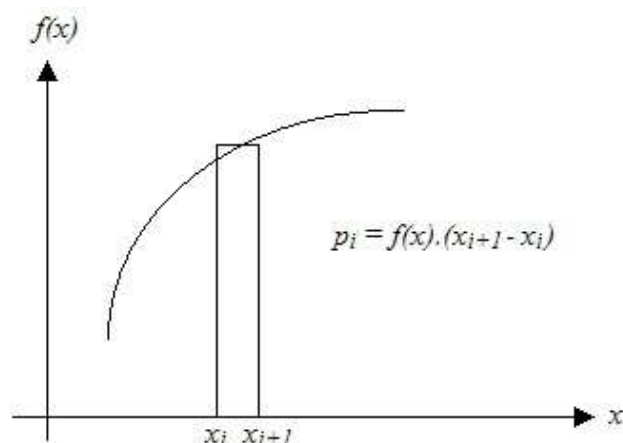
$$f(x) = \frac{p_i}{x_{i+1} - x_i} \quad (1.61)$$

A probabilidade  $p(x)$  tal que  $x_i \leq x \leq x_{i+1}$ , é, então:

$$p_i = f(x) \cdot (x_{i+1} - x_i) \quad (1.62)$$

A Figura 1.8 ilustra a “assimilação” indicada na equação (1.62). Este procedimento, empregado nos cálculos relativos à atuação dos VEs, permite tratar a variável aleatória contínua como se fosse discreta. Observa-se que, em geral, procura-se empregar um intervalo que seja possível ignorar as variações de  $f(x)$ , porventura, existentes.

Figura 1.8 – Procedimento de cálculo da probabilidade



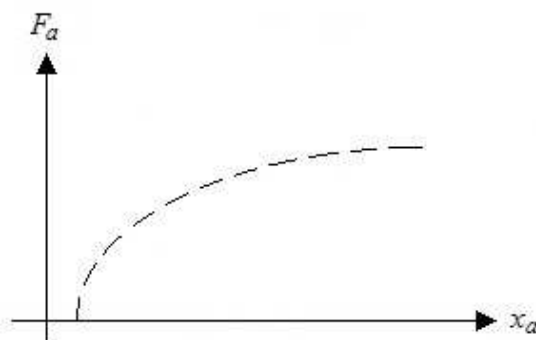
Fonte: [PECORELLI PERES, 2000a] (adaptado pelo autor, 2015).

A acumulação sucessiva dos valores de  $p_i$ , resulta na relação expressa em (1.63):

$$F_a = \sum_{i=1}^a p_i \quad (1.63)$$

Onde:  $a = 1, 2, 3, \dots, n$  estabelece os valores de  $F_a$  nos pontos  $x_a$ .

Na Figura 1.9 vem apresentada a aproximação de  $F(x)$ , através da  $F_a$ . Como se vê, uma série de segmentos retilíneos foi elaborada ligando-se os pontos correspondentes a  $x_a$  entre si, admitindo-se, como já foi dito, que a função densidade de probabilidade é considerada constante nestes intervalos.

Figura 1.9 – Ilustração de  $F_a$ 

Fonte: [PECORELLI PERES, 2000a] (adaptado pelo autor, 2015).

As distribuições de probabilidades constituem, do ponto de vista da simulação dos sistemas, o meio de descrever uma variável aleatória. Elas podem ser interpretadas como um conjunto que registra os resultados de um dado número de observações, considerando somente os valores que a variável aleatória assumiu sem, contudo, indicar a sequência destes valores com a qual esta variável ocorreu. Ao se conduzir uma simulação de um processo que envolve este tipo de variável, o problema se inverte. É necessário então, gerar uma sequência de números tais que os respectivos valores se sucedam de forma aleatória e possuam a mesma distribuição que descreve a variável aleatória. Este procedimento é utilizado neste trabalho com a finalidade de estabelecer os processos com os quais os VEs atuam nas áreas urbanas.

Vários dispositivos e técnicas numéricas foram desenvolvidos para produzir tais sequências. Na forma digital, é amplamente descrita pela literatura técnica sob a denominação de números pseudoaleatórios. Pelo fato deste procedimento se assemelhar com uma roleta para jogos, o nome Monte Carlo, que se associa a cassinos, tornou-se um termo genérico com o qual se descreve os métodos computacionais que lidam com a simulação de variáveis aleatórias [CHWIF, 2007; RAGSDALE, 2004]. Com este sentido, designa-se, então, de “Método de Monte Carlo” e “Simulação de Monte Carlo”, amplamente utilizada para resolver problemas de ciência e engenharia. Tendo em vista que nem sempre tal método é empregado para a simulação de um processo aleatório, como por exemplo, no cálculo de uma integral de grande complexidade de uma função, cujo resultado é de natureza determinística, fez com que Hammersley e Handscomb distinguíssem os dois tipos de Métodos de Monte Carlo [HAMMERSLEY, 1964]. Àquele que se refere a um processo aleatório, corresponde à aplicação utilizada na simulação de sistemas.

É corriqueiro dispor-se, em calculadoras e computadores digitais, de comandos capazes de gerarem números aleatórios (“pseudo”) com uma distribuição uniforme, cujas funções densidade de probabilidade e distribuição cumulativa de probabilidade vêm indicadas em (1.64) e (1.65), respectivamente:

$$\begin{aligned} f(x) &= 1 & ; & & 0 \leq x \leq 1 \\ f(x) &= 0 & ; & & x < 0 \quad e \quad x > 1 \end{aligned} \tag{1.64}$$

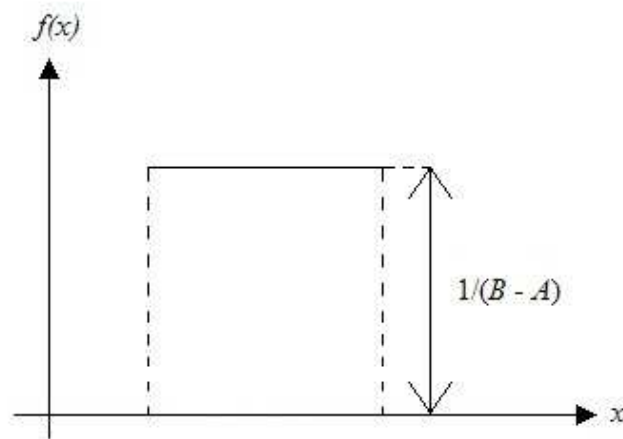
$$F(x) = x & ; & 0 \leq x \leq 1 \tag{1.65}$$

Diversos métodos foram desenvolvidos para gerar distribuições não uniformes baseados no princípio de que é possível a transformação de uma sequência de números

aleatórios uniformemente distribuídos de igual probabilidade de ocorrerem numa sequência pré-definida. O método utilizado neste trabalho é o *Probability Integral Transformation*.

A distribuição uniforme assume, na sua forma mais geral, a variável aleatória contida numa faixa  $A \leq x \leq B$ . A probabilidade de uma variável  $x$  ocorrer num intervalo é proporcional a razão entre a amplitude do intervalo e a faixa  $(B - A)$ . Isto é, qualquer ponto da faixa possui chance igual de ocorrer, como já foi dito. Deste modo, a probabilidade de  $x$  ocorrer no intervalo  $\Delta x$  é  $\Delta x / (B - A)$ . Graficamente, a Figura 1.10 exprime este conceito no qual se destaca o segmento retilíneo de altura  $1 / (B - A)$  entre os pontos  $A$  e  $B$ .

Figura 1.10 – Função distribuição cumulativa da função uniforme



Fonte: [PECORELLI PERES, 2000a] (adaptado pelo autor, 2015).

Não existe perda de generalidade ao assumir  $f(x) = 1$ , onde  $x_i$  é uma sequência uniformemente distribuída na faixa 0 a 1, pois  $(B - A).x_i + A$  é também uma sequência uniformemente distribuída na faixa  $A$  a  $B$ .

Tendo em vista que ao se utilizar, em simulação, a distribuição uniforme para obter distribuições não uniformes, este processo conduz a escolha de um certo número de dígitos, dependente da precisão desejada, para representar uma quantidade variável contínua, já que um número finito de dígitos permite tão somente representar um número finito de valores. Levando em conta que o número de dígitos é elevado, principalmente nos computadores atuais, isto acarreta que o número de valores possíveis que podem ser assumidos seja suficientemente grande, viabilizando assim a aproximação do tratamento da variável contínua como discreta, conforme já havia sido observado.

A descrição completa de uma variável aleatória requer, portanto, o conhecimento da sua distribuição de probabilidade em uma de suas várias formas de representação, fato este

admitido para se lidar com o problema em pauta. Costuma-se sumariar a informação contida na distribuição de probabilidade através de momentos [MEYER, 2012]. Entre essas medidas, as quais são objetivo de determinar nas simulações de sistemas, encontra-se o valor esperado, ou expectativa, ou valor médio, ou, ainda, primeiro momento da distribuição, expresso por:

$$E(x) = \int xf(x)dx \quad (1.66)$$

$$E(x) = \sum x_i p(x_i) \quad (1.67)$$

A integral em (1.66) refere-se à variável contínua e o somatória em (1.67) à variável discreta. Ambos são efetuados para todos os valores de  $x$  no qual a distribuição seja definida. Vale lembrar que  $E(x)$ , é uma entidade estatística que constitui um atributo de uma determinada distribuição de probabilidade com o qual, no trabalho em pauta, procurou-se exprimir os resultados das simulações com os VEs. Outra observação é quanto à denominação “valor esperado”, que merece reservas, no sentido de que este valor realmente ocorra. De fato, se  $x$  é uma variável aleatória discreta,  $E(x)$  pode nem ser um valor possível de  $x$ . É verdade que se o experimento para o qual  $x$  é definido fosse repetido muitas vezes, independentemente, e os valores de  $x$  fossem colecionados e calculados a sua média, então esta média seria “próxima” de  $E(x)$ , num certo sentido probabilístico. Esta proximidade matemática exprime a conhecida “Lei dos Grandes Números” [MEYER, 2012].

Conforme já mencionado, neste trabalho foi usada a função densidade de probabilidade lognormal para tratar as variáveis aleatórias, a saber: distância percorrida pelos VEs antes da recarga e horário de conexão dos VEs à rede. Sendo assim, seja  $x = e^y$ , em que  $y$  é uma variável aleatória normalmente distribuída com média  $\mu$  e variância  $\sigma^2$ . A variável aleatória  $x$  é dita ter distribuição lognormal e tem a função densidade de probabilidade expressa pela equação (1.68).

$$f(x) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (1.68)$$

A variável aleatória  $x$  tem valor esperado e variância conforme apresentado nas equações (1.69) e (1.70), respectivamente.

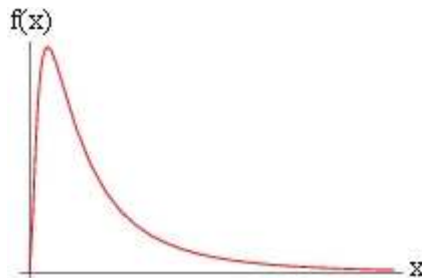


$$E(x) = e^{\mu + \frac{\sigma^2}{2}} \quad (1.69)$$

$$V(x) = (e^{\sigma^2} - 1) \cdot (e^{2\mu + \sigma^2}) \quad (1.70)$$

Para gerar números aleatórios  $x$  que seguem uma distribuição lognormal, primeiro pode-se gerar números aleatórios  $y$  normalmente distribuídos e em seguida transformá-los fazendo  $x = e^y$ . A Figura 1.11 ilustra o comportamento de uma distribuição lognormal.

Figura 1.11 – Função Densidade de Probabilidade Lognormal



Fonte: WebCalc ([http://www.webcalc.com.br/frame.asp?pag=http://www.webcalc.com.br/utilitarios/func\\_distlognorm.html](http://www.webcalc.com.br/frame.asp?pag=http://www.webcalc.com.br/utilitarios/func_distlognorm.html)), 2015.

## 2 METODOLOGIA

Neste capítulo será apresentado o tratamento determinístico e estocástico desenvolvido para análise de veículos elétricos rodoviários conectados a um transformador de distribuição. Para tanto, é necessário o conhecimento das características da recarga dos veículos elétricos, bem como o comportamento de suas curvas de recarga compostas pela potência ativa durante todo o período de recarga.

É oportuno, neste instante, apresentar as hipóteses consideradas neste trabalho para esta metodologia, que são:

- a) Foco exclusivo no veículo elétrico rodoviário à bateria (VEB);
- b) Sistema trifásico equilibrado;
- c) Fator de potência normativo de 0,92 indutivo;
- d) Recarga das baterias efetuada do estado de carga inicial até 100 %;
- e) Modelos baseados em medições próprias e em dados de placa das baterias de tração e dos carregadores dos veículos elétricos;
- f) Tratamento probabilístico das variáveis referente à distância percorrida e ao horário de conexão dos VEs utilizando função densidade de probabilidade lognormal.

A metodologia desenvolvida aplicasse à análise dos efeitos da recarga de veículos elétricos às redes de distribuição, no contexto das redes inteligentes de energia (*smart grids*), no que se refere à potência ativa durante este processo. A potência reativa de recarga de VEs é desprezível frente à potência ativa, o que é comprovado pelo elevado fator de potência da carga veículo elétrico, conforme será apresentado nos itens que se seguem.

### 2.1 Caracterização da Recarga de Veículos Elétricos à Bateria

O reabastecimento de energia de um VEB é simplesmente a recarga de sua bateria, da mesma forma como é feito para os celulares, smartphones, tablets e notebooks, por exemplo. O tempo de recarga é variável segundo desejo do proprietário do veículo, sendo conhecido

apenas, para cada VE, o tempo da recarga completa, que corresponde ao reabastecimento total da bateria desde o estado de carga inicial zero ao estado de carga 100 %.

Neste trabalho, no entanto, conforme mencionado nas hipóteses consideradas, será simulado o reabastecimento de veículos elétricos até o estado de carga final de 100 %, entretanto, o estado de carga inicial dependerá do tipo de tratamento adotado durante as simulações para a distância percorrida, se determinística ou probabilística.

No contexto das redes inteligentes de energia é esperado que os veículos elétricos sejam recarregados no período noturno que compreende o intervalo de tempo de valores reduzidos de potência ativa da curva de demanda de um transformador, ou de um sistema de energia em geral. Segundo características do conceito *smart grid*, este período corresponde também à tarifa de energia reduzida, tornando a recarga destes veículos mais barata neste período. A conexão à rede para a recarga será gerenciada pela própria rede inteligente de forma automática levando em conta a dados instantâneos da rede, como capacidade e nível de tensão, por exemplo. O usuário terá, através de um medidor de energia inteligente, acesso a todos os dados da recarga de seu veículo, tais como, tempo de recarga, energia consumida, potência, fator de potência e até mesmo o valor, em R\$, referente àquela recarga, além de outros.

Um painel de recarga alimentado por uma tensão de 127 ou 220 V e composto por uma tomada simples, ou com intertravamento, dependendo do tipo de veículo a ser carregado (bicicleta, scooter, carro, moto etc.) e, conseqüentemente, do nível de tensão, é suficiente para reabastecer de energia a bateria de qualquer veículo elétrico, uma vez que as características de recarga são comuns a todos os VEs, conforme será apresentado nos itens subsequentes.

As maiores vantagens da recarga dos veículos elétricos para seus usuários são o fato de poderem fazê-la em casa e o do reabastecimento de VEBs custar cerca de 3 vezes menos que o de um VCI de mesmo porte, conforme estudos no LSPV / UERJ.

## **2.2 Efeito da Recarga de Veículos Elétricos em Transformadores**

Alguns são os efeitos que vêm sendo estudados referentes à recarga dos veículos elétricos em transformadores de baixa tensão. Este trabalho se restringe à análise dos efeitos de recarga relacionados ao acréscimo de potência ativa na curva de demanda de transformadores de baixa tensão.

Este é um estudo importantíssimo e de enorme interesse para as empresas distribuidoras de energia, pois pouco se sabe sobre o comportamento deste efeito e não há bibliografias que mostrem este efeito baseado em medições próprias como será mostrado neste trabalho. Atribuindo, assim, a este trabalho, a característica de pesquisa pioneira nesta área.

De acordo com as medições e simulações realizadas no LSPV o nível máximo de potência ativa exigida durante o processo de recarga depende do retificador (carregador) do veículo elétrico projetado com este fim. Normalmente, o retificador é dimensionado de modo a compatibilizar a tensão e a capacidade de corrente alternada de entrada disponível com a tensão do banco de baterias do veículo e a corrente contínua de saída, para que o processo de recarga seja realizado em um período de tempo razoável sem que cause danos às células das baterias, respeitando as normas de instalação elétrica específicas. Assim, as características técnicas indicadas na placa do carregador indicam os limites operacionais de tensão e corrente alternadas a serem supridas pelas redes de energia com que os veículos elétricos se conectam para reabastecimento. De uma, maneira geral, os tipos usuais de carregadores utilizam um processo que combina inicialmente corrente constante e tensão constante. Ao final do processo de recarga a corrente decai gradativamente enquanto que a tensão é mantida constante, reduzindo assim a potência ativa. Os carregadores de bateria devem apresentar um elevado rendimento e fator de potência.

A curva de demanda dos transformadores retrata o comportamento da carga total por ele alimentada e é constituída por um gráfico em barras verticais com intervalos discretos de 15 minutos, que descreve o comportamento da carga diária total suprida pelo transformador, sendo composta, então, por um total de 96 intervalos de 15 minutos, totalizando 1440 minutos, que correspondem a 24 horas.

Para o desenvolvimento da metodologia proposta, a carga existente na curva de demanda do transformador é considerada fixa e esta curva se repete de forma idêntica a cada período de 24 horas. Nas simulações serão usadas duas curvas de demanda constituindo um período total de 48 horas, pois se acredita que, devido aos benefícios já mencionados das *smart grids*, os veículos elétricos serão carregados no período noturno. Presume-se que os primeiros veículos se conectarão por volta das 21:00 e as conexões se estenderão pela madrugada, sempre de forma automática gerenciada pela própria rede inteligente. Isso explica a necessidade de usar um período de 48 horas, pois assim é possível visualizar, de forma mais clara, o efeito do acréscimo de potência ativa durante a recarga dos veículos elétricos no transformador, num período que compreende o final de um dia e início do outro.

O elevado nível de potência ativa nos transformadores, acima da nominal, causa aquecimento excessivo nos enrolamentos e, conseqüentemente, redução da vida útil do mesmo. Por isso, o objetivo deste trabalho é avaliar o acréscimo de potência ativa em um transformador devido à recarga de um conjunto de veículos elétricos conectados a este, de forma determinística e aleatória, e mostrar que uma quantidade considerável de veículos elétricos pode ser recarregada sem que haja a necessidade iminente de substituição do transformador por outro de maior capacidade. Reduzindo assim os custos e aumentando os lucros com a penetração gradativa dos VEs no país.

### **2.3 Normas Brasileiras Referentes à Recarga de Veículos Elétricos**

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) publicou, no dia 3 de junho de 2013, a norma “ABNT NBR IEC 61851-1:2013 – Sistema de Recarga Condutiva para Veículos Elétricos”, a primeira das três partes que estabelecem as regras para a recarga de veículos elétricos. Frutos do trabalho da Comissão de Estudo 03:069.01 - Veículos Elétricos Rodoviários e Industriais, coordenado pelo Comitê Brasileiro de Eletricidade (ABNT/CB-003). As três partes da normativa entraram em vigor no dia 3 de julho de 2013.

Com 47 páginas, a primeira parte da norma, “ABNT NBR IEC 61851-1:2013 – Parte 1: Requisitos Gerais”, é aplicável aos sistemas embarcados ou não embarcados para a recarga de veículos elétricos rodoviários com tensões alternadas normalizadas (conforme a IEC 60038) até 1000 V e com tensões contínuas até 1500 V, assim como para a alimentação com energia elétrica a todos os serviços auxiliares do veículo durante a conexão à rede elétrica, se necessário [ABNT, 2013a].

A segunda parte, com 12 páginas, “ABNT NBR IEC 61851-21:2013 – Parte 21: Requisitos de Veículos Elétricos para a Conexão Condutiva a uma Alimentação em Corrente Alternada ou Contínua”, junto com a primeira, fornece os requisitos aplicáveis ao veículo elétrico para a conexão em modo condutivo a uma alimentação em tensão alternada até 690 V, conforme a IEC 60038, ou em tensão contínua até 1000 V, quando o veículo elétrico é conectado a uma rede de alimentação [ABNT, 2013b].

Por fim, a terceira parte, com 17 páginas, “ABNT NBR IEC 61851-22:2013 – Parte 22: Estação de Recarga em Corrente Alternada para Veículos Elétricos”, juntamente com a parte 1, fornece os requisitos para estação de recarga em corrente alternada de veículos

elétricos, para a conexão condutiva ao veículo, com tensões de alimentação alternada em conformidade com a IEC 60038, até 690 V [ABNT, 2013c].

As normas acima descritas devem ser seguidas em conjunto com a norma regulamentadora “NR 10 – Segurança em Instalações e Serviços em Eletricidade”, que estabelece os requisitos e condições mínimas objetivando a implementação de medidas de controle e sistemas preventivos, de forma a garantir a segurança e a saúde dos trabalhadores que, direta ou indiretamente, interajam em instalações elétricas e serviços com eletricidade [MTE, 1987], bem como a norma “ABNT NBR 5410 – Instalações Elétricas de Baixa Tensão”, que estabelece as condições a que devem satisfazer as instalações elétricas de baixa tensão, a fim de garantir a segurança de pessoas e animais, o funcionamento adequado da instalação e a conservação dos bens [ABNT, 2004].

Com o objetivo de estabelecer os critérios técnicos e as condições mínimas para fornecimento de energia elétrica em tensão primária de distribuição à unidade consumidora com carga instalada superior a 75 kW e demanda contratada ou estimada pelo consumidor, para o fornecimento, igual ou inferior a 2500 kW, a Ampla Energia e Serviços S.A., empresa do Grupo Enel, disponibilizou em seu site o “Padrão de Fornecimento de Energia Elétrica” [GRUPO ENEL, 2007], para tensão primária – 15 kV, na sua área de concessão. Esta referência foi importante na elaboração desta dissertação uma vez que foi desenvolvida no âmbito do projeto Cidade Inteligente Búzios da referida empresa.

## **2.4 Curva de Recarga de Veículos Rodoviários Leves e Ciclomotores Elétricos**

O desenvolvimento da metodologia de avaliação dos efeitos da recarga de veículos elétricos apresentada neste trabalho baseou-se nos resultados dos ensaios de recarga efetuados no LSPV com ciclomotores, ou bicicletas elétricas, e carros elétricos, mais precisamente com a bicicleta elétrica LEV modelo E-BIKE S e o carro Palio Weekend Elétrico apresentados no capítulo 1.

Nos ensaios de recarga, foi constatado que os veículos elétricos apresentam uma curva de recarga (potência ativa) peculiar, composta por um trecho em potência praticamente constante seguido de um decaimento linear, aproximadamente uma rampa, quando a recarga chega aos 10 a 20 minutos finais. O valor da potência ativa constante é determinado pelas características do carregador do veículo, e o tempo total de recarga é diretamente proporcional

à distância total percorrida pelo usuário antes da recarga, conforme será mostrado nos ensaios de percurso e de recarga que se seguem.

#### **2.4.1 Ensaio de Percurso**

Diversos ensaios de percursos foram realizados utilizando os veículos elétricos supracitados para que fosse possível a realização de vários ensaios de recarga, cada ensaio de percurso resultou em um ensaio de recarga. Todos os ensaios de percurso foram iniciados com a bateria dos veículos 100 % carregadas.

A seguir, serão apresentados os resultados do ensaio de percurso realizado com a bicicleta elétrica e os resultados do ensaio de percurso com o carro elétrico, escolhidos para o desenvolvimento da metodologia.

##### **Ensaio de Percurso com o Palio Weekend Elétrico**

O percurso escolhido para o desenvolvimento da metodologia liga a sede da LIGHT, situada na Avenida Marechal Floriano, 168, Centro, Rio de Janeiro, e o LSPV, localizado na Rua Fonseca Teles, 121, São Cristóvão, Rio de Janeiro, conforme mapa da Figura 2.1.

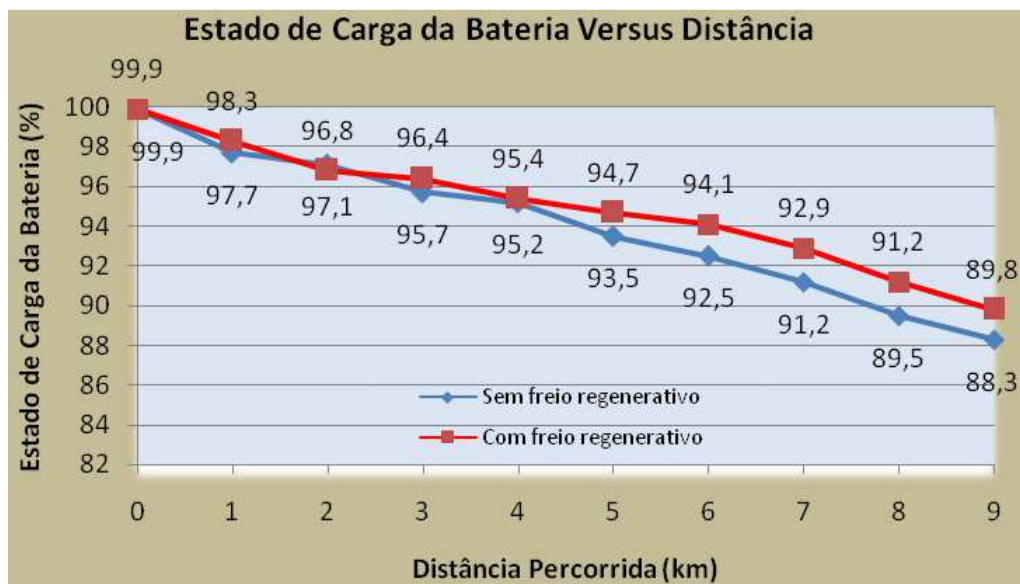
A Figura 2.2 mostra a curva do comportamento do estado de carga da bateria em função da distância percorrida pelo veículo com e sem o uso da frenagem regenerativa. Esta análise pôde ser realizada devido ao veículo em teste possuir um botão no painel para ligar ou desligar o sistema de frenagem regenerativa. A partir do gráfico pode-se observar que, para um mesmo percurso, o sistema de frenagem regenerativa do veículo proporciona uma recuperação da carga da bateria no final do trajeto de aproximadamente 1,7 % em relação à carga final sem sistema regenerativo.

Figura 2.1 – Mapa do trajeto do ensaio de percurso do Palio Weekend Elétrico



Fonte: Relatório técnico do LSPV / UERJ, 2011.

Figura 2.2 – Estado de carga da bateria do Palio Weekend Elétrico durante o percurso



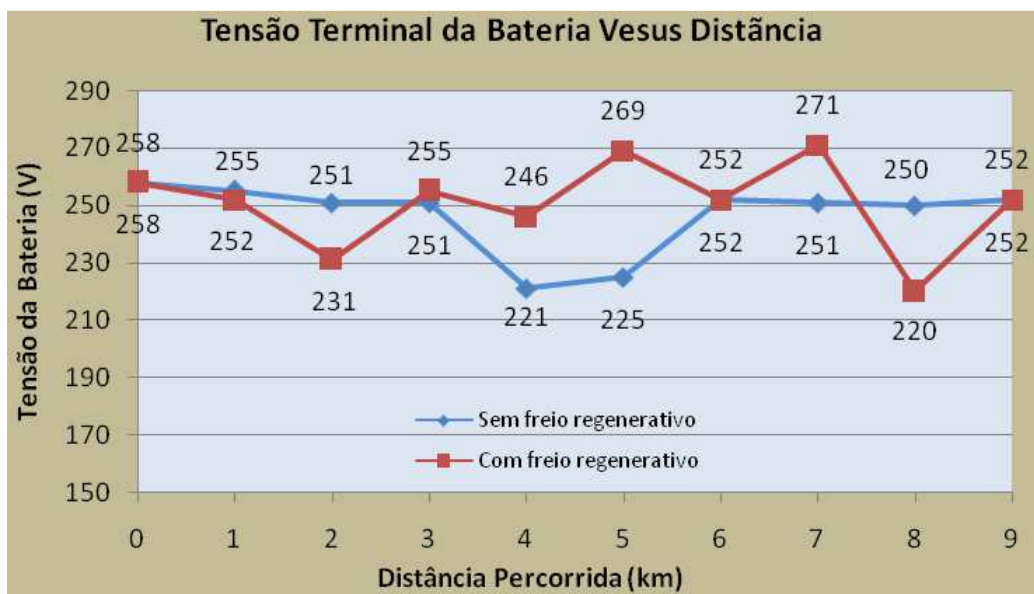
Fonte: Relatório técnico do LSPV / UERJ, 2011.

A Figura 2.3 apresenta o comportamento da tensão terminal da bateria em função da distância percorrida pelo veículo com e sem o uso da frenagem regenerativa. Este gráfico indica que a tensão terminal da bateria no final do trajeto, nas condições com e sem freio



regenerativo, foi de 252 V, o que corresponde a uma variação de -2,33% em relação à tensão de 258 V medida no início do trajeto.

Figura 2.3 – Tensão da bateria do Palio Weekend Elétrico durante o percurso



Fonte: Relatório técnico do LSPV / UERJ, 2011.

A Figura 2.4 mostra uma fotografia do Palio Weekend chegando ao LSPV, finalizando seu ensaio de percurso.

Figura 2.4 – Ensaio de percurso do Palio Weekend Elétrico



Fonte: Relatório técnico do LSPV / UERJ, 2011.

A Tabela 2.1 apresenta os dados obtidos durante o ensaio de percurso do veículo.

Tabela 2.1 – Dados do ensaio de percurso do Palio Weekend Elétrico

<b>Ensaio de Trajeto do Veículo Elétrico</b>					
<b>Data</b>	<b>Registro do Veículo</b>	<b>Tipo do Percurso</b>	<b>Configuração do Veículo</b>		
12/07/11	Placa KNW-8628	Curto	Carga leve: 1 passageiro		
<b>Nome do Ensaio</b>		<b>Responsável Técnico pelo Ensaio</b>			
ET02120711		Marcus Lellis Pacífico Peçanha			
<b>Leitura dos Parâmetros no Ensaio</b>					
<b>Leitura</b>	<b>Horário</b>	<b>Hodômetro (km)</b>	<b>Estado de Carga (%)</b>	<b>Tensão da Bateria (V)</b>	<b>Temperatura (°C)</b>
1	13:29	2056	99,9 /99,5	258/253	245/244
2	13:46	2057	98,3	252	245
3	13:50	2058	96,8	231	246
4	13:51	2059	96,4	255	246
5	13:52	2060	95,4	246	247
6	13:53	2061	94,7	269	248
7	13:56	2062	94,1	252	249
8	13:59	2063	92,9	271	251
9	14:09	2064	91,2	220	252
10	14:15	2065	89,8	252	254

Fonte: NOTA TÉCNICA LIGHT, 2011.

Da Tabela 2.1 é possível extrair que a distância total percorrida foi de 9 km e que este trajeto foi percorrido num intervalo de tempo de 46 min.

### **Ensaio de Percurso com a Bicicleta Elétrica LEV**

Os ensaios de percurso com a bicicleta elétrica foram feitos no estacionamento do Instituto Estadual do Meio Ambiente (INEA), onde também se encontra o LSPV.

O ensaio escolhido para utilização dos dados para a elaboração da metodologia de avaliação dos efeitos da recarga de VEs foi o referente à distância total percorrida de 4,4 km, cujo tempo de percurso foi de 12 min e 30 s.

A Figura 2.5 mostra o ensaio de percurso sendo executado pelo próprio autor deste trabalho e as Figuras 2.6 e 2.7 apresentam os membros da equipe que participaram dos ensaios.

Figura 2.5 – Ensaio de percurso da bicicleta elétrica



Fonte: O autor, 2014.

Figura 2.6 – Orientador e autor do trabalho após ensaio de percurso



Fonte: O autor, 2014.

Figura 2.7 – Equipe do LSPV responsável pelos ensaios



Fonte: O autor, 2014.

#### **2.4.2 Ensaio de Recarga**

Após o término dos ensaios de percurso foram efetuados os ensaios de recarga no LSPV com o painel de recarga da MES-DEA. Todas as recargas foram executadas até que o estado de carga da bateria atingisse seu valor máximo de 100 %.

A seguir, serão apresentados, então, os resultados do ensaio de recarga realizado com o carro elétrico e os resultados do ensaio com a bicicleta elétrica, escolhidos para o desenvolvimento da metodologia.

#### **Ensaio de Recarga do Pálio Weekend Elétrico**

A medição das grandezas elétricas durante o ensaio de recarga do carro elétrico foi realizada com o analisador de energia MARH – 21/993 fabricado pela RMS.

A Tabela 2.2 a seguir mostra os dados considerados do banco de baterias do Pálio Weekend Elétrico, utilizado para construção do modelo.

Tabela 2.2 – Dados do banco de baterias do Palio Weekend Elétrico

Tensão Nominal (V)	Capacidade (Ah)	Rendimento do Conjunto Bateria – Carregador
253	76	0,95

Fonte: PEREIRA, 2015a; PEREIRA, 2015b.

A Tabela 2.3 apresenta os valores medidos durante o teste de recarga do Palio Weekend Elétrico realizada no LSPV.

Tabela 2.3 – Valores medidos durante o teste de recarga

Duração da Recarga (min)	Energia Gasta (Wh)	Potência Máxima Média (W)
52	1951	3250

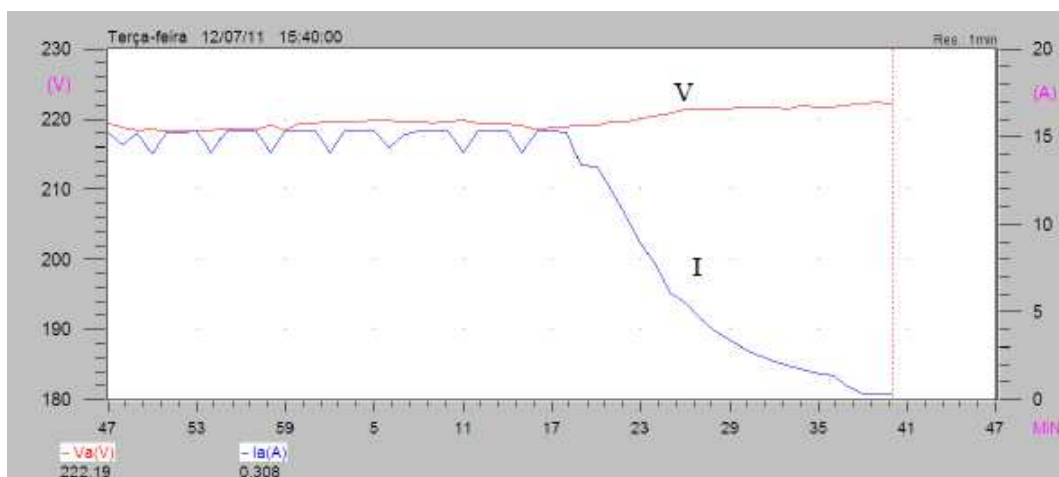
Fonte: PEREIRA, 2015a; PEREIRA, 2015b.

A razão entre o tempo de recarga (52 min) da Tabela 2.3 e a distância percorrida (9 km) no ensaio de percurso, informa a estimativa do tempo de recuperação da energia gasta a cada quilômetro, cujo valor é de 5,9 min/km. Ou seja, a cada 6 minutos de recarga, aproximadamente, é devolvido à bateria a energia gasta para percorrer 1 km.

Sabendo que 1 kWh = 3,6 MJ, dividindo-se o valor da energia gasta (1951 Wh = 7,024 MJ) da Tabela 2.3 pela distância percorrida (9 km) no ensaio de percurso, tem-se que o consumo energético do Palio Weekend Elétrico é de 0,78 MJ/km.

As Figuras 2.8 a 2.10 apresentam os gráficos referente aos resultados do teste de recarga do Palio Weekend Elétrico.

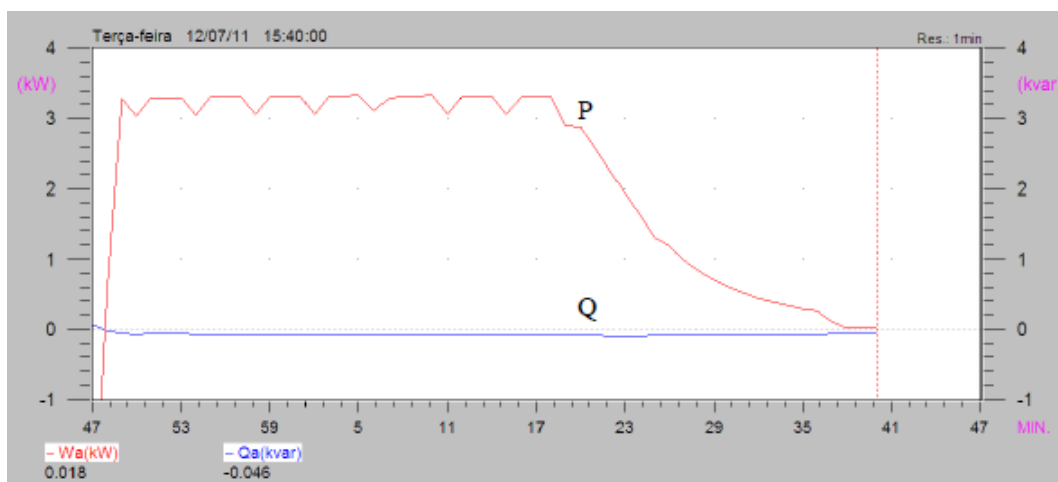
Figura 2.8 – Tensão (V) e corrente (I) durante a recarga



Fonte: PEREIRA, 2015a; PEREIRA, 2015b.

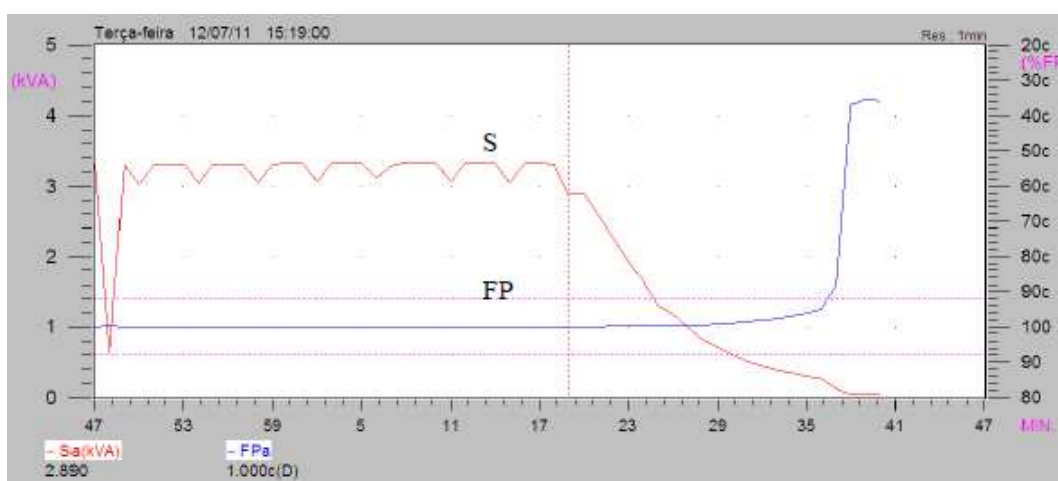


Figura 2.9 – Potências ativa (P) e reativa (Q) durante a recarga



Fonte: PEREIRA, 2015a; PEREIRA, 2015b.

Figura 2.10 – Potência aparente (S) e fator de potência (FP) durante a recarga



Fonte: PEREIRA, 2015a; PEREIRA, 2015b.

De acordo com a Figura 2.8, verifica-se que a tensão média medida durante a recarga é de 219,9 V e que a corrente elétrica máxima média é de 15,1 A.

Da Figura 2.9, observa-se que a potência ativa máxima média é de 3250 W e que a potência reativa média é aproximadamente zero.

Por fim, a Figura 2.10 ilustra que a potência aparente máxima média é de 3280 VA e que o fator de potência médio constante é de 0,99 indutivo.

A Figura 2.11 ilustra um Palio Weekend Elétrico utilizado nos ensaios de recarga e de desempenho realizados no LSPV, sendo recarregado em um eletroposto apropriado da concessionária de energia Ampla em Niterói, após um dos ensaios de percurso realizados pela equipe do LSPV. Os veículos ilustrados nas Figuras 2.4 e 2.11 são idênticos, pois ambos

foram fabricados pela Itaipu Binacional e suas parceiras no projeto, FIAT e KWO, conforme mencionado no capítulo 1. Especificamente, o Palio Weekend Elétrico da Figura 2.11 atualmente faz parte da frota de veículos elétricos do projeto Cidade Inteligente Búzios.

Figura 2.11 – Palio Weekend Elétrico sendo recarregado



Fonte: Relatório técnico do LSPV / UERJ, 2012.

### Ensaio de Recarga da Bicicleta Elétrica LEV

Os mesmos procedimentos de recarga aplicados ao Palio Weekend Elétrico foram realizados com uma bicicleta elétrica da marca LEV. A Tabela 2.4 mostra os dados do banco de baterias da bicicleta.

Tabela 2.4 – Dados da bateria da bicicleta elétrica

Tensão Nominal (V)	Capacidade (Ah)	Rendimento do Conjunto Bateria – Carregador
36	12	0,95

Fonte: PEREIRA, 2015b.

A Tabela 2.5 apresenta os valores medidos durante o teste de recarga da bicicleta elétrica realizado no LSPV utilizando-se, neste caso, um protótipo de posto de recarga desenvolvido pelo LSPV, que conta com medição inteligente POWERSAVE.

Tabela 2.5 – Valores medidos durante o teste de recarga da bicicleta elétrica

<b>Tempo de Recarga (min)</b>	<b>Energia Gasta (Wh)</b>	<b>Potência Máxima Média (W)</b>
88	109,23	81,02

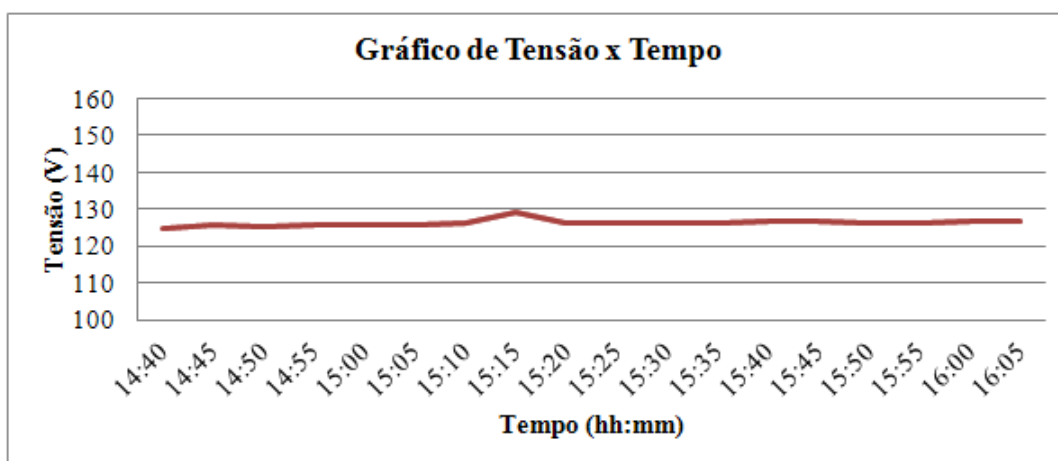
Fonte: PEREIRA, 2015b.

A razão entre o tempo de recarga (88 min) da Tabela 2.5 e a distância percorrida (4,4 km) no ensaio de percurso, informa a estimativa do tempo de recuperação da energia gasta a cada quilômetro, cujo valor é de 20 min/km. Ou seja, a cada 20 minutos de recarga, aproximadamente, é devolvido à bateria a energia gasta para percorrer 1 km.

Sabendo que 1 kWh = 3,6 MJ, dividindo-se o valor da energia gasta (109,23 Wh = 0,393 MJ) da Tabela 2.5 pela distância percorrida (4,4 km) no ensaio de percurso, tem-se que o consumo energético da bicicleta elétrica LEV é de 0,09 MJ/km.

As Figuras 2.12 a 2.16 apresentam os resultados do teste de recarga da bicicleta elétrica.

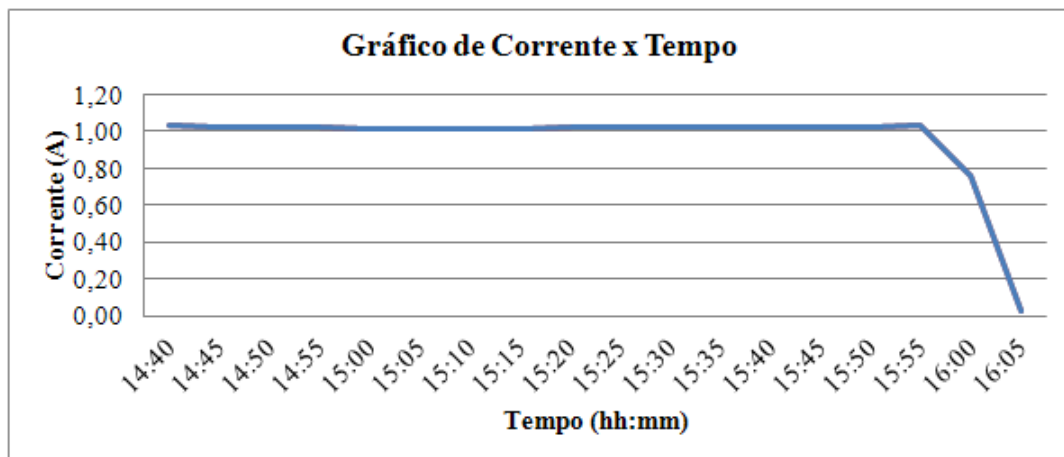
Figura 2.12 – Tensão durante a recarga



Fonte: O autor, 2015.

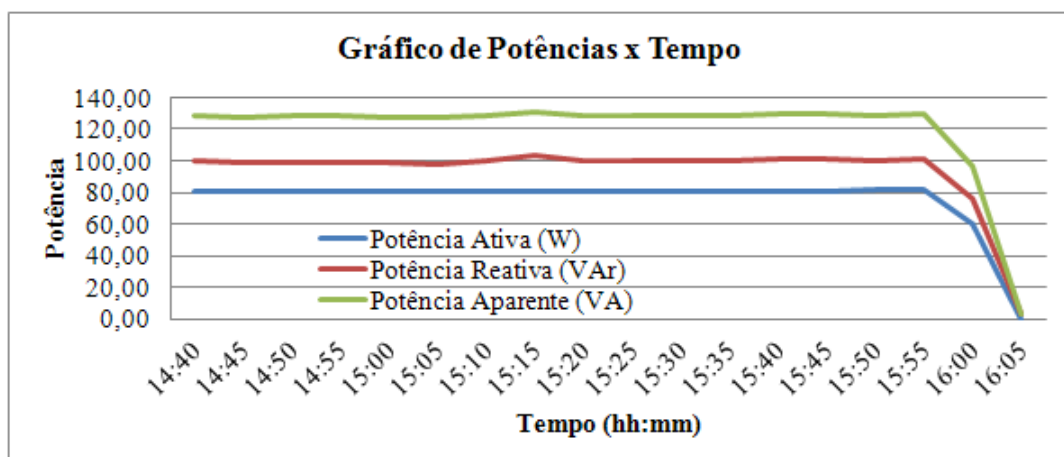


Figura 2.13 – Corrente durante a recarga



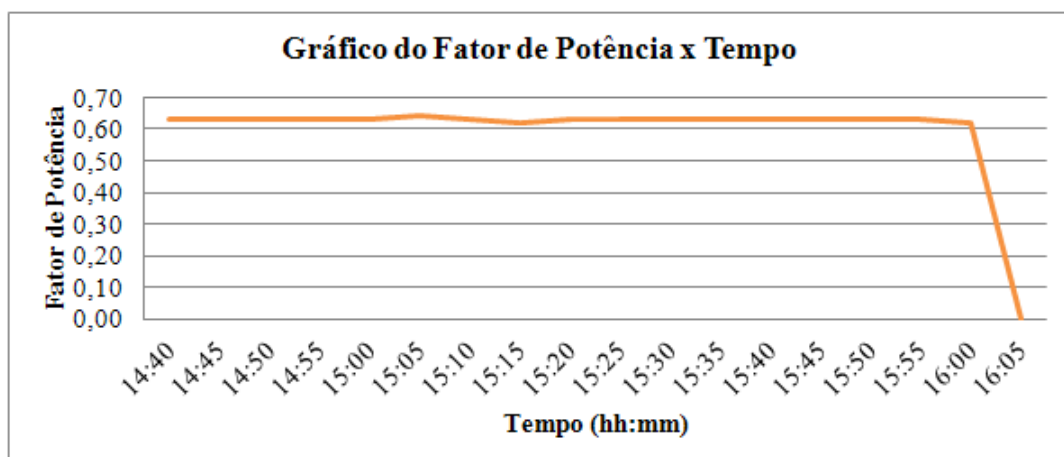
Fonte: O autor, 2015.

Figura 2.14 – Potências ativa, reativa e aparente durante a recarga



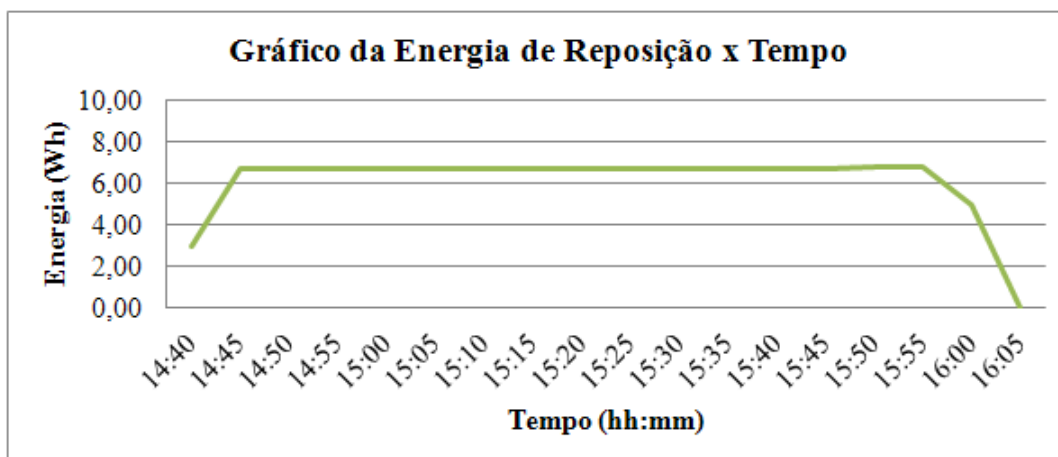
Fonte: O autor, 2015.

Figura 2.15 – Fator de potência durante a recarga



Fonte: O autor, 2015.

Figura 2.16 – Reposição da energia durante a recarga



Fonte: O autor, 2015.

De acordo com as Figuras 2.12 e 2.13, verifica-se que a tensão média medida durante a recarga foi de 126,24 V, e que a corrente elétrica máxima média foi de 1,02 A.

Através da Figura 2.14, verifica-se que a potência ativa máxima média foi de 80,02 W, que a potência máxima média reativa foi de 100,00 VAR e que a potência máxima média aparente foi de 128,80 VA, durante a recarga da bicicleta elétrica.

De posse da Figura 2.15, é possível verificar que o fator de potência durante a recarga se manteve no valor médio de 0,63 indutivo. Este valor baixo é devido à pouca atenção dada à confecção do carregador da bicicleta por este corresponder a uma carga pequena, porém, como a demanda ativa durante a recarga é também baixa, o baixo fator de potência não causará muitos problemas à rede elétrica.

No ensaio de recarga da bicicleta elétrica, no entanto, pôde ser construído o gráfico da reposição da energia gasta durante o ensaio de percurso em função do tempo. Pelo gráfico apresentado na Figura 2.16 nota-se que a energia gasta é recuperada de forma praticamente constante. Dividindo-se a de energia total repostada (área do gráfico da Figura 2.16) pelo tempo de reposição dessa energia, tem-se que a taxa de reposição da energia gasta é de 1,24 Wh/min.

A Figura 2.17 ilustra a bicicleta elétrica LEV durante seu ensaio de recarga no LSPV, após ter percorrido os 4,4 km de seu teste de percurso.

Figura 2.17 – Bicicleta elétrica LEV durante ensaio de recarga



Fonte: O autor, 2014.

## 2.5 Modelagem da Curva de Recarga de Veículos Elétricos

Os ensaios efetuados pela equipe do LSPV com o Palio Weekend Elétrico, a bicicleta elétrica LEV e diversos outros veículos indicaram que os efeitos da tensão, da corrente e do fator de potência ao longo do processo de recarga resultam numa forma característica da potência ativa. De fato, esta grandeza se mantém praticamente constante seguida de um decaimento que pode ser aproximado a uma rampa decrescente, conforme ilustrado anteriormente nas Figuras 2.9 e 2.14, onde se verifica que o trecho final se reduz a um valor residual, quando então o estado de carga da bateria alcança 100 %. Esta forma se mantém alterando-se apenas o período em que a potência se mantém constante em função da menor ou maior energia requerida, que é função principalmente da distância percorrida limitada pela capacidade da bateria, a qual determina a autonomia do veículo.

Esta constatação permite uma modelagem da curva de recarga de veículos elétricos bastando para isso os ensaios supracitados e os dados de placa do carregador e do banco de baterias do veículo. Assim, para analisar a demanda da rede de suprimento dos veículos

elétricos em recarga basta fazer a superposição das curvas de recarga dos veículos pretendidos à curva de demanda do transformador da rede. Isto é oportuno uma vez que os demais veículos elétricos tais como, *scooters*, *skates*, etc. também apresentam o mesmo comportamento de recarga.

Esta concepção foi utilizada neste trabalho para análise da capacidade de transformadores trifásicos típicos de distribuição, como os conectados na alta tensão dos alimentadores de 13,8 kV da Cidade Inteligente Búzios, objeto de análises específicas nas quais se deseja avaliar o suprimento adicional dos veículos elétricos. O processo utilizado para isso foi obtido pelo tratamento da recarga com uma formulação em termos de variáveis discretas para representar a demanda com intervalos de tempo correspondentes à medição convencional dos sistemas elétricos, igual a 15 minutos. Com isto, o tempo máximo de recarga, que equivale à reposição de 100 % do estado de carga da bateria, será um múltiplo de 15, cuja demanda máxima refere-se às características de potência e rendimento do carregador, e a energia refere-se à capacidade do banco de baterias.

Assim, basta tomar como referências os dados do banco de baterias (tensão nominal em V e capacidade da bateria em Ah), conforme Tabelas 2.2 e 2.4, bem como a distância percorrida (km) no ensaio de percurso, e os dados do ensaio de recarga (energia gasta em Wh e potência média máxima em W), assinalados nas Tabelas 2.3 e 2.5. Com isto é possível modelar, com auxílio da ferramenta computacional MATLAB, as curvas de recarga total (0 a 100%) do Palio Weekend Elétrico e da bicicleta elétrica, referentes às autonomias dos respectivos veículos.

A metodologia empregada para a obtenção dessas curvas de recarga total dos VEs, cujas variáveis são as mesmas usadas em ambiente computacional MATLAB, é descrita abaixo:

- a) Calcula-se a energia total máxima da bateria, em Wh, para o carro e a bicicleta, respectivamente, através das equações em (2.1).

$$E_{totalMAX\_carro} = \frac{Vb\_carro.Cb\_carro}{\eta C}$$

$$E_{totalMAX\_bike} = \frac{Vb\_bike.Cb\_bike}{\eta B} \quad (2.1)$$

Onde:  $Vb\_carro$  e  $Vb\_bike$  são as tensões das respectivas baterias, em V;

$Cb\_carro$  e  $Cb\_bike$  são as capacidades das respectivas baterias, em Ah;

$\eta C$  e  $\eta B$  são os rendimentos dos respectivos conjuntos bateria-carregador.

- b) Calcula-se a eficiência do veículo, em Wh/km, para o carro e a bicicleta, respectivamente, através das equações em (2.2).

$$Eficiencia\_carro = \frac{Eteste\_carro}{Steste\_carro}$$

$$Eficiencia\_bike = \frac{Eteste\_bike}{Steste\_bike} \quad (2.2)$$

Onde:  $Eteste\_carro$  e  $Eteste\_bike$  são as energias gastas no ensaio de recarga, em Wh;

$Steste\_carro$  e  $Steste\_bike$  são as distâncias percorridas no ensaio de percurso, em km.

- c) Calcula-se a distância máxima percorrida, em km, para o carro e a bicicleta, respectivamente, através das equações em (2.3).

$$deltaS\_carro = \frac{EtotalMAX\_carro}{Eficiencia\_carro}$$

$$deltaS\_bike = \frac{EtotalMAX\_bike}{Eficiencia\_bike} \quad (2.3)$$

Onde:  $EtotalMAX\_carro$  e  $EtotalMAX\_bike$  são as energias máximas das baterias, em Wh;

$Eficiencia\_carro$  e  $Eficiencia\_bike$  são as eficiências dos veículos, em Wh/km.

- d) Calcula-se o número de intervalos de 15 minutos da curva de recarga da autonomia do veículo, para o carro e a bicicleta, respectivamente, através das equações em (2.4).

$$N\_carro = \frac{EtotalMAX\_carro}{\frac{P15\_carro}{(1/4)}}$$

$$N_{bike} = \frac{E_{totalMAX\_bike}}{\frac{P15_{bike}}{(1/4)}} \quad (2.4)$$

Onde:  $P15_{carro}$  e  $P15_{bike}$  são as potências máximas média, em W.

Nas equações apresentadas em (2.4) a fração (1/4) representa, em hora, o tempo de 15 minutos decorridos em cada intervalo da curva de recarga e os valores das potências máximas média  $P15_{carro}$  e  $P15_{bike}$  são apresentados nas Tabelas 2.3 e 2.5 do ensaio de recarga.

- e) Calcula-se a energia, em Wh, do último intervalo de 15 minutos da curva de recarga da autonomia do veículo, para o carro e a bicicleta, respectivamente, através das equações em (2.5).

$$E_{linha\_carro} = (N_{carro} - 1).P15_{carro}.\frac{1}{4}$$

$$E_{linha\_bike} = (N_{bike} - 1).P15_{bike}.\frac{1}{4} \quad (2.5)$$

Onde:  $N_{carro}$  e  $N_{bike}$  são o número de intervalos das curvas de recarga das autonomias.

- f) Calcula-se a potência do último intervalo de 15 minutos, em W, através das equações em (2.6), para o carro e a bicicleta, respectivamente.

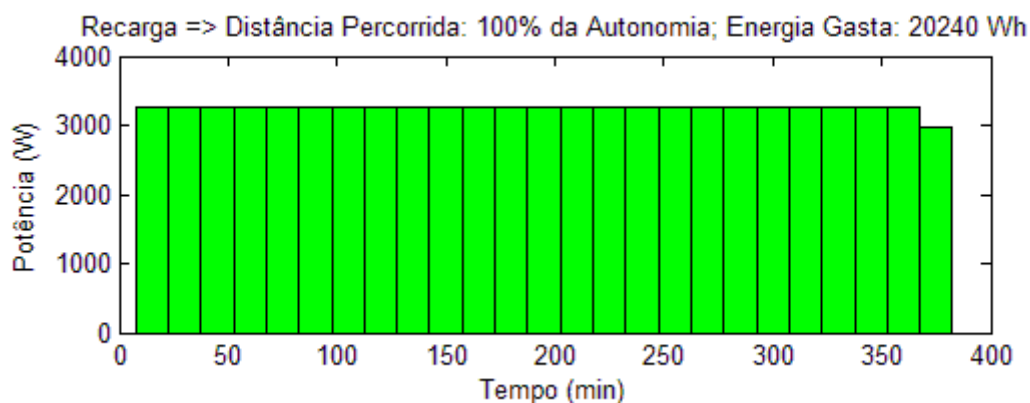
$$P15_{final\_carro} = \frac{(E_{totalMAX\_carro} - E_{linha\_carro})}{1/4}$$

$$P15_{final\_carro} = \frac{(E_{totalMAX\_carro} - E_{linha\_carro})}{1/4} \quad (2.6)$$

Os cálculos apresentados nas etapas de a) a e) foram assim transcritos em ambiente MATLAB. Com isso, os vetores potência, energia e distância puderam ser criados, onde os elementos de cada vetor referem-se aos valores representativos de cada intervalo de 15 minutos da curva de recarga, e assim, finalmente pôde ser modelada a curva de recarga da

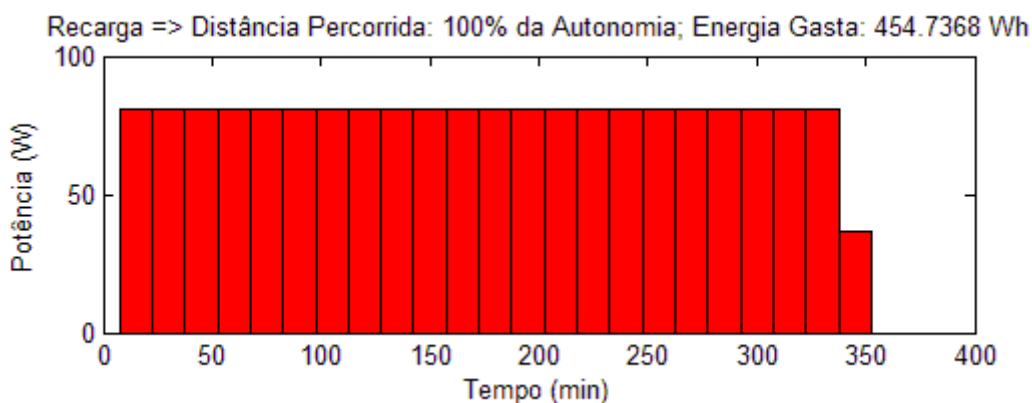
autonomia do carro e da bicicleta, assumindo que, para ambos os veículos, as distâncias percorridas em cada intervalo de 15 minutos, ou seja, cada elemento do vetor distância, são iguais. Sendo assim, as Figuras 2.18 e 2.19 apresentam as curvas de recarga da autonomia do carro e da bicicleta, respectivamente.

Figura 2.18 – Curva de recarga da autonomia do Palio Weekend Elétrico



Fonte: PEREIRA, 2015b.

Figura 2.19 – Curva de recarga da autonomia da bicicleta elétrica LEV



Fonte: PEREIRA, 2015b.

Para cada veículo, com base na curva de recarga total, qualquer outra curva referente à distância percorrida menor que a autonomia pode ser obtida variando-se apenas o número de intervalos de 15 minutos de potência máxima. Destaca-se que se dispõe da taxa de recarga de energia, que é obtida pela razão da energia gasta pelo tempo de recarga, cujos valores se encontram nas Tabelas 2.3 e 2.5. Adota-se que a magnitude da potência no último intervalo de 15 minutos em todas as curvas de recarga é igual a da recarga total. Eventuais discrepâncias

nos valores calculados para a energia gasta durante a recarga podem ser atribuídas à avaliação feita para o rendimento dos carregadores dos veículos, que nesta modelagem foi admitido como sendo 95 % em ambos os veículos.

## 2.6 Superposição da Curva de Recarga na Curva de Demanda

Para simular a superposição da curva de recarga dos veículos elétricos na curva de demanda do transformador, foram feitas 4 simulações diferentes, a saber:

- a) **Simulação Determinística:** Este caso simula a situação em que todos os veículos percorreram a mesma distância e todos iniciaram suas respectivas recargas em um mesmo horário de conexão com a rede elétrica. Este seria o pior cenário, porém o menos propenso a ocorrer;
- b) **Simulação Probabilística da Distância Percorrida:** Este caso simula a situação em que os veículos percorreram distâncias diferentes, mas todos ainda continuam iniciando suas respectivas recargas em um mesmo horário de conexão com a rede elétrica. Este seria um cenário menos agravante que o anterior, porém ainda seria muito difícil de acontecer uma vez que dificilmente todos os veículos iniciaram suas recargas no mesmo horário de conexão;
- c) **Simulação Probabilística do Horário de Conexão:** Este caso simula a situação em que todos os veículos percorreram a mesma distância, porém iniciam suas respectivas recargas em horários de conexão diferentes com a rede elétrica. Este seria um cenário bem menos agravante que os anteriores, porém ainda seria muito difícil de acontecer uma vez que nem todos os usuários percorreriam a mesma distância antes de recarregarem seus veículos;
- d) **Simulação Probabilística do Horário de Conexão e da Distância Percorrida:** Este caso simula a situação em que os veículos percorreram distâncias diferentes e iniciam suas respectivas recargas em horários de conexão diferentes com a rede elétrica. Este seria o cenário mais realista, pois sabe-se que nem todos os usuários percorrem a mesma distância antes de recarregarem seus veículos e que nem todos os veículos iniciam suas recargas no mesmo horário de conexão.



Para cada uma dessas 4 simulações existem 3 configurações de frotas de veículos a serem analisadas, que são:

- a) **Frota de Carros Elétricos:** Neste momento será simulada uma frota de veículos constituída apenas por Palios Weekend Elétricos idênticos;
- b) **Frota de Bicicletas Elétricas:** Neste momento será simulada uma frota de veículos constituída apenas por bicicletas elétricas LEV idênticas;
- c) **Frota de Carros e Bicicletas Elétricos:** Neste momento serão simuladas duas frotas de veículos simultaneamente, uma constituída por Palios Weekend Elétricos idênticos e outra por bicicletas elétricas LEV idênticas.

A superposição das curvas de recarga de cada uma dessas 3 configurações de frotas de veículos elétricos na curva de demanda será analisada segundo as 4 simulações apresentadas anteriormente, dando um total de 12 simulações diferentes que visam estudar o efeito do acréscimo de potência ativa na curva de demanda do transformador.

Nas simulações probabilísticas, para distância percorrida e/ou horário de conexão, a modelagem foi realizada considerando uma função densidade de probabilidade lognormal, cujas equações são descritas em (2.7) e (2.8).

$$M_{distancia} = e^{\left(MU_{distancia} + \frac{SIGMA_{distancia}^2}{2}\right)}$$

$$M_{hora} = e^{\left(MU_{hora} + \frac{SIGMA_{hora}^2}{2}\right)} \quad (2.7)$$

$$V_{distancia} = e^{(2 \cdot MU_{distancia} + SIGMA_{distancia}^2)} \cdot (e^{(SIGMA_{distancia}^2)} - 1)$$

$$V_{hora} = e^{(2 \cdot MU_{hora} + SIGMA_{hora}^2)} \cdot (e^{(SIGMA_{hora}^2)} - 1) \quad (2.8)$$

Onde  $M_{distancia}$  e  $M_{hora}$  são os valores esperados e  $V_{distancia}$  e  $V_{hora}$  são as variâncias da distribuição lognormal para os casos em que distância percorrida e o horário de conexão são variáveis aleatórias, respectivamente.

O valor esperado e a variância da lognormal, por sua vez, são funções das médias e dos desvios padrão da distribuição normal associada, de acordo com as equações (2.9) e (2.10), respectivamente.

$$MU\_distancia = \log\left(\frac{M\_distancia^2}{\sqrt{V\_distancia + M\_distancia^2}}\right)$$

$$MU\_hora = \log\left(\frac{M\_hora^2}{\sqrt{V\_hora + M\_hora^2}}\right) \quad (2.9)$$

$$SIGMA\_distancia = \sqrt{\log\left(\frac{V\_distancia}{M\_distancia^2 + 1}\right)}$$

$$SIGMA\_hora = \sqrt{\log\left(\frac{V\_hora}{M\_hora^2 + 1}\right)} \quad (2.10)$$

Onde  $MU\_distancia$  e  $MU\_hora$  são as médias e  $SIGMA\_distancia$  e  $SIGMA\_hora$  são os desvios padrão da distribuição normal associada para os casos em que distância percorrida e o horário de conexão são variáveis aleatórias, respectivamente.

Nas simulações em que a distância percorrida é uma variável aleatória, o valor esperado da lognormal corresponde ao número de intervalos de 15 minutos da curva de recarga média desta distribuição. Entretanto, nas simulações em que o horário de conexão é uma variável aleatória, o valor esperado da lognormal corresponde ao ponto de conexão médio desta distribuição, compreendido entre os valores 1 e 192, onde 1 corresponde ao horário de 0:15 e 192 ao horário de 0:00 do segundo dia da curva de demanda de 48 horas adotada. As variâncias correspondem ao quadrado da quantidade de intervalos de 15 minutos, das curvas de recarga ou da curva de demanda, para os casos em que a variável aleatória é a distância percorrida ou o horário de conexão, respectivamente.

As variáveis  $M\_distancia$ ,  $V\_distancia$  e, conseqüentemente,  $MU\_distancia$  e  $SIGMA\_distancia$  podem receber os complementos  $\_carro$  e  $\_bike$  para diferenciar estes veículos em scripts do MATLAB onde ambos os veículos figurarem na mesma simulação.

Uma vez que o carro e a bicicleta têm autonomias diferentes, os valores das variáveis acima precisam ser ajustados. Os valores adotados foram:

- a)  $M_{distancia\_carro} = 13$  (curva de recarga com 13 intervalos de 15 min)
- b)  $M_{distancia\_bike} = 12$  (curva de recarga com 12 intervalos de 15 min)
- c)  $M_{hora} = 27$  (ponto 27 da curva de demanda, equivalente às 6:45)
- d)  $V_{distancia\_carro} = 48$  (quadrado da curva de recarga de 6,93 intervalos)
- e)  $V_{distancia\_bike} = 40,9$  (quadrado da curva de recarga com 6,39 intervalos)
- f)  $V_{hora} = 315,9$  (quadrado do ponto 17,77 da curva de demanda)

Consequentemente, tem-se:

- g)  $MU_{distancia\_carro} = 2,44$  (curva de recarga com 2,44 intervalos de 15 min)
- h)  $MU_{distancia\_bike} = 2,36$  (curva de recarga com 2,36 intervalos de 15 min)
- i)  $MU_{hora} = 3,12$  (ponto 3,12 da curva de demanda)
- j)  $SIGMA_{distancia\_carro} = 0,5$  (desvio padrão de 50 %)
- k)  $SIGMA_{distancia\_bike} = 0,5$  (desvio padrão de 50 %)
- l)  $SIGMA_{hora} = 0,6$  (desvio padrão de 60 %)

Com o objetivo de visualizar o carregamento dos veículos elétricos durante todo o período noturno que se inicia no final de um dia e termina na manhã do outro, o horário de conexão de todos os veículos nas simulações foram deslocados de um valor  $\delta M$ , cujo valor é a diferença entre o ponto da curva de demanda que se deseja coincidir com o valor esperado da lognormal ( $x_{IR\_medio}$ ) e o ponto definido inicialmente para ser o valor esperado da lognormal ( $M_{hora}$ ). Desta forma, então, todos os veículos tiveram seus pontos de conexão, ou horários de conexão, na curva de demanda acrescidos de  $\delta M = x_{IR\_medio} - M_{hora}$ . Para  $x_{IR\_medio} = 114$ , por exemplo,  $\delta M = 114 - 27 = 87$  pontos, ou intervalos de 15 minutos. Logo, por exemplo, o ponto de conexão correspondente ao valor esperado da lognormal passou do ponto 27, equivalente ao horário de 6:45 do primeiro dia, para o ponto 114, equivalente ao horário de 4:30 do dia seguinte, da curva de demanda de 48 horas.

Devido às diferentes quantidades de veículos elétricos nas frotas de carros e de bicicletas, a simulação Monte Carlo para carros contou com 2000 sorteios, tanto para as simulações em que a distância percorrida é a variável aleatória quanto para as simulações em que o horário de conexão é a variável aleatória. Já a simulação Monte Carlo para bicicletas contou com 60 sorteios em cada simulação das referidas variáveis.

A escolha da função densidade de probabilidade lognormal para a distância percorrida pelos veículos, ou seja, para o estado de carga da bateria, antes do início da recarga é sustentada por estatísticas elaboradas com carros à combustão interna nos EUA, uma vez que este experimento estatístico, em princípio, independe de o veículo ser elétrico ou não, e teve como referência o relatório da *Electric Power Research Institute* – EPRI, de 1978, também utilizado em [Orr, 1982] e [STAATS, 1997b].

Já a escolha da função densidade de probabilidade lognormal para o horário de conexão dos veículos à rede elétrica baseou-se na tendência da concentração da recarga após o horário de ponta devido ao custo atrativo da recarga para os usuários e para as empresas de energia, transformando em um bom negócio para ambos, clientes e empresas. Além do fato de que se o usuário conectar muito tarde da madrugada pode não dar tempo do carro estar 100 % carregado quando o mesmo for utilizar o veículo no dia seguinte.

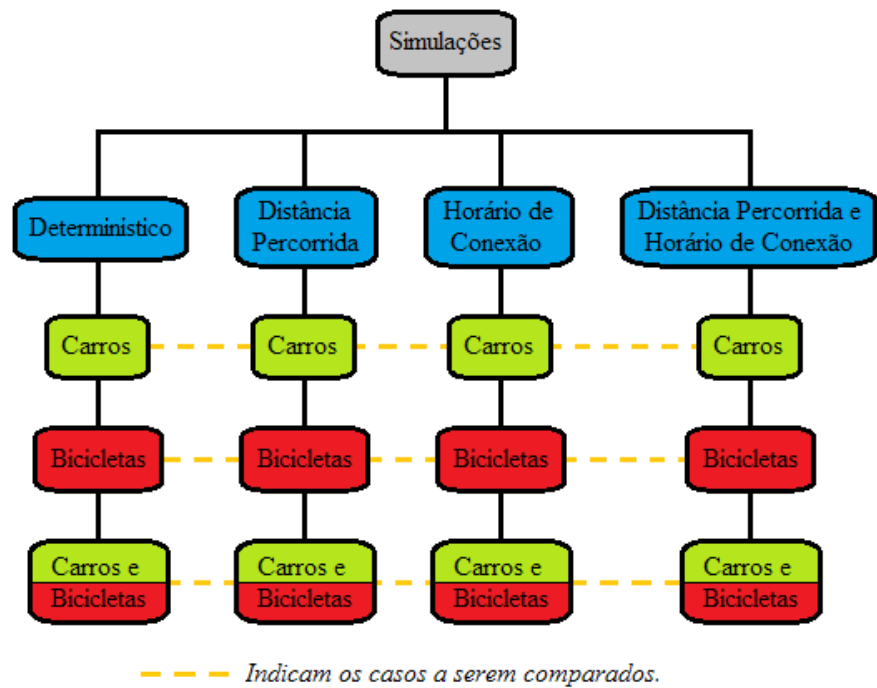
As simulações que precederam esta metodologia mostraram que, em média, o número de carros e de bicicletas nas respectivas frotas que corresponde a uma demanda, em kW, aproximada segue a relação de 1 carro para 42 bicicleta. Sendo assim, nas simulações apresentadas no próximo capítulo, manteve-se esta relação, ponderando o fato de que se deseja manter o sistema trifásico equilibrado utilizando múltiplos de três veículos em cada frota, em todas as simulações.

## 2.7 Fluxograma das Simulações

A Figura 2.20 abaixo ilustra a sequência das simulações decorrentes da aplicação da metodologia de análise do abastecimento de veículos elétricos no contexto das redes inteligentes de energia, descrita neste capítulo.

Nesta figura é possível visualizar a sequência das 12 simulações propostas começando pela coluna das simulações determinísticas das três frotas (Carros; Bicicletas; Carros e Bicicletas), seguido das colunas referentes às simulações probabilísticas (Distância Percorrida; Horário de Conexão; Distância Percorrida e Horário de Conexão) destas frotas.

Figura 2.20 – Fluxograma das simulações decorrentes da aplicação da metodologia



Fonte: O autor, 2015.

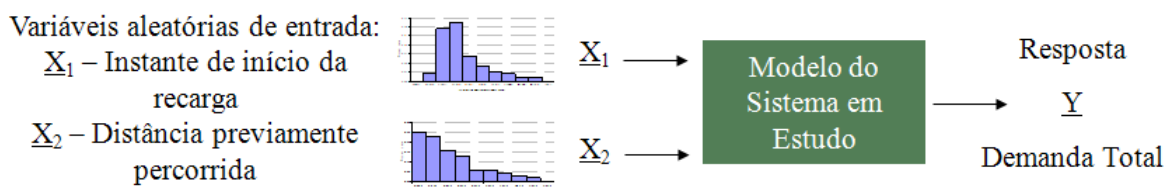
### 3 RESULTADO, ANÁLISE E DISCUSSÃO

#### 3.1 Simulação Computacional

Segundo [PEGDEN, c1995], a simulação é um processo de projetar o modelo de um sistema real e conduzir experimentos com esse modelo, a fim de entender seu comportamento e/ou avaliar estratégias para sua operação. Ela possibilita explorar o sistema real com modificações de políticas, procedimentos, operações ou métodos com custo e tempo relativamente baixos, sem interferir no sistema real. A simulação é uma ferramenta útil no dimensionamento de redes elétricas e na avaliação de riscos de sobrecarga e falhas no fornecimento de energia.

A Figura 3.1 ilustra o esquema de uma simulação probabilística. Neste processo, as variáveis aleatórias  $X_1$  e  $X_2$  não estão sob controle do tomador de decisão ou há incertezas quanto aos valores que estas variáveis podem assumir. A simulação, então, descreve a distribuição dos possíveis valores da variável resposta  $Y$ , depois de determinados os possíveis valores e comportamentos das variáveis de entrada. Desta forma, a simulação torna possível, pelo exame dos experimentos, a realização de inferências sobre o comportamento de um sistema probabilístico.

Figura 3.1 – Esquema de uma simulação probabilística



Fonte: O autor, 2015.

Conforme mencionado no capítulo anterior, as simulações para avaliação do efeito do acréscimo de potência ativa na curva de demanda de um transformador devido à recarga de veículos elétricos foram realizadas em ambiente MATLAB. Com o objetivo de proporcionar uma evolução gradativa das simulações, a fim de se alcançar uma situação realista de recarga de veículos elétricos em um transformador operando em um ambiente de redes inteligentes de energia, as simulações foram realizadas de acordo com o roteiro descrito a seguir:

- a) Simulação determinística: Considerou-se que todos os veículos de uma mesma frota percorrem a mesma distância antes da recarga, ou seja, possuem o mesmo estado de carga inicial, e iniciam suas recargas simultaneamente num mesmo horário de conexão pré-definido. Este seria o pior caso e o mais improvável de acontecer na realidade;
- b) Primeira simulação probabilística: Sabendo que os usuários dificilmente percorrerão a mesma distância antes da recarga, considerou-se uma simulação probabilística em que a distância percorrida é uma variável aleatória, cuja distribuição de probabilidade é descrita pela função de densidade lognormal. Entretanto, os veículos ainda iniciam suas recargas simultaneamente num mesmo horário de conexão pré-definido;
- c) Segunda simulação probabilística: Sabendo que os usuários, ou as redes inteligentes de energia, dificilmente iniciarão as recargas dos veículos ao mesmo tempo, considerou-se uma simulação probabilística em que o horário de conexão é uma variável aleatória com distribuição de probabilidade lognormal. Visando analisar o efeito isolado do horário de conexão como uma variável aleatória, na segunda simulação probabilística considerou-se que todos os veículos percorrem as mesmas distâncias antes da recarga;
- d) Terceira simulação probabilística: Unindo as etapas b) e c) tem-se uma simulação probabilística em que tanto a distância percorrida quanto o horário de conexão serão tratados como uma variável aleatória, ambas com função densidade de probabilidade lognormal, portanto, trata-se do caso mais realista.

Em todas as simulações supracitadas foram avaliadas frotas de carros e de bicicletas separadamente e em conjunto, mantendo a relação verificada de 1 carro para cada 42 bicicletas apresentada no capítulo 2.

### 3.2 Cenário do Trabalho

Para a realização das simulações, utilizou-se uma curva típica de carga ativa de um transformador de 75 kVA suprindo uma área residencial com parque e ciclovia, dispondo de

serviços de aluguel bicicletas elétricas e usuários de carros elétricos, do mesmo modo empregado em [PEREIRA, 2014; PEREIRA, 2015a; PEREIRA, 2015b].

A Tabela 3.1 apresenta os dados do transformador e os dados de demanda (Potência Ativa), em kW, para cada intervalo de 15 minutos.

Tabela 3.1 – Dados do transformador de 75 kVA e da sua curva de demanda típica

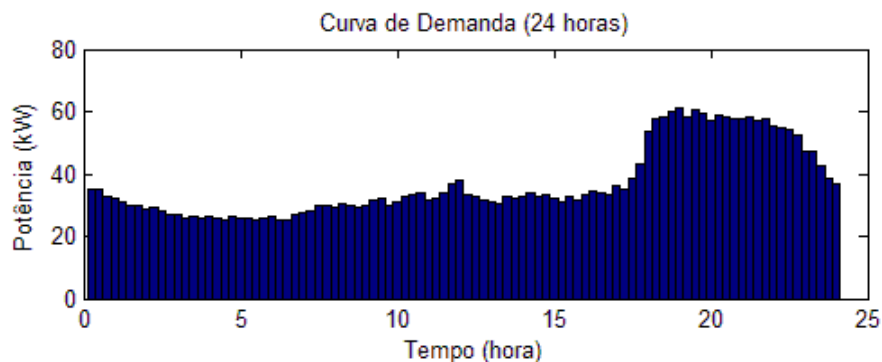
<b>Dados do Transformador</b>							
Dados típicos: Transformador trifásico 13,8 kV / 220 V, delta-estrela, 60 Hz							
Corrente de excitação máxima: 3,4%							
Perdas em vazio máxima: 390 W (núcleo)							
Perdas totais máxima: 1530 W (núcleo e enrolamentos)							
Tensão de curto-circuito (75°C): 3,5% (correspondente à impedância)							
<b>Dados da Curva de Carga</b>							
<b>Hora</b>	<b>Potência</b>	<b>Hora</b>	<b>Potência</b>	<b>Hora</b>	<b>Potência</b>	<b>Hora</b>	<b>Potência</b>
0:15	35,32	6:15	25,29	12:15	33,27	18:15	57,63
0:30	34,88	6:30	25,49	12:30	32,83	18:30	58,12
0:45	32,83	6:45	27,15	12:45	31,60	18:45	60,12
1:00	32,04	7:00	27,35	13:00	31,06	19:00	61,20
1:15	31,02	7:15	27,88	13:15	30,28	19:15	58,02
1:30	29,79	7:30	29,84	13:30	32,97	19:30	60,47
1:45	30,14	7:45	29,84	13:45	31,95	19:45	59,29
2:00	28,91	8:00	29,06	14:00	32,73	20:00	56,89
2:15	29,06	8:15	30,72	14:15	34,05	20:15	58,56
2:30	28,33	8:30	29,99	14:30	32,53	20:30	58,22
2:45	26,81	8:45	29,55	14:45	33,46	20:45	57,53
3:00	26,81	9:00	30,04	15:00	31,95	21:00	57,53
3:15	26,07	9:15	31,36	15:15	30,77	21:15	58,17
3:30	26,27	9:30	32,39	15:30	32,83	21:30	57,09
3:45	25,68	9:45	29,94	15:45	31,65	21:45	57,68
4:00	26,52	10:00	31,16	16:00	33,41	22:00	55,08
4:15	25,98	10:15	32,78	16:15	34,44	22:15	54,55
4:30	25,34	10:30	33,17	16:30	34,15	22:30	54,11
4:45	26,22	10:45	34,20	16:45	33,61	22:45	52,54
5:00	25,63	11:00	31,41	17:00	36,10	23:00	47,01
5:15	26,03	11:15	32,29	17:15	35,17	23:15	46,96
5:30	25,49	11:30	33,95	17:30	38,79	23:30	42,71
5:45	25,93	11:45	36,98	17:45	42,95	23:45	38,40
6:00	26,52	12:00	37,77	18:00	53,91	0:00	36,98

Fonte: O autor, 2015.



De posse desses dados, foi construída, em ambiente MATLAB, sua curva de demanda diária em intervalos discretos de 15 minutos, apresentada na Figura 3.2, conforme usualmente empregado pelas empresas do setor elétrico.

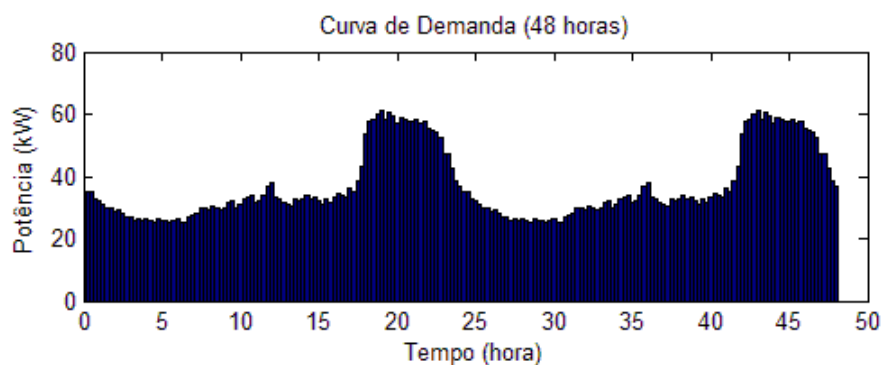
Figura 3.2 – Curva de demanda do transformador de distribuição



Fonte: O autor, 2015.

Nas simulações, a fim de se analisar os efeitos da recarga dos veículos elétricos no período noturno, assume-se que a curva de demanda do transformador se repete de forma idêntica a cada dia. Sendo assim, a demanda utilizada nas simulações abrange um período total de 48 horas, conforme apresentado na Figura 3.3.

Figura 3.3 – Curva de demanda das simulações



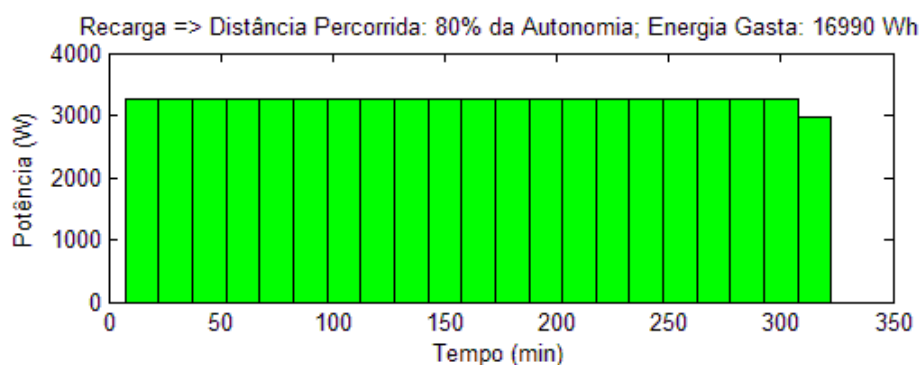
Fonte: O autor, 2015.

### 3.3 Resultados da Simulação Determinística

#### Simulação com Carros Elétricos

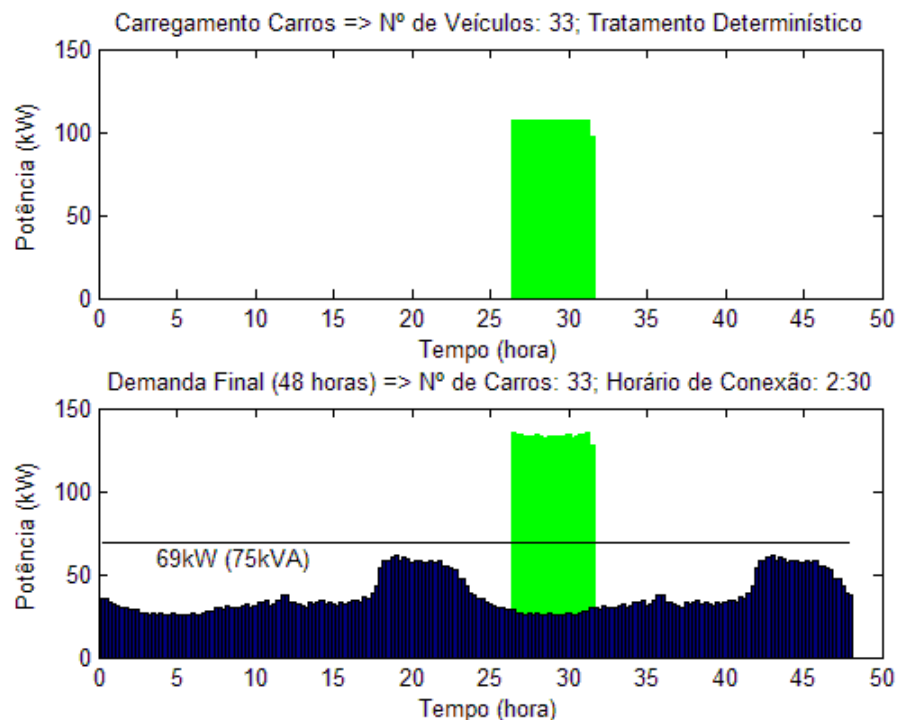
Com base nas formulações indicadas no capítulo 2 obteve-se a curva de recarga do carro elétrico (Palio Weekend Elétrico) ilustrada na Figura 3.4. Esta curva tem como característica o fato de que o consumo de 80 % da autonomia do veículo corresponde à uma distância percorrida da ordem de 74,7 km/dia. Tal veículo simula um dos carros da frota de uma empresa de prestação de serviços de entrega que realiza a recarga de sua frota em período noturno em garagem utilizando-se da tarifa comercial, portanto, com um custo bem menor neste período. Admite-se que a frota possui 33 carros idênticos. Na sequência, na Figura 3.5 apresenta-se a curva de carregamento, em verde, referente à recarga de toda a frota e a curva de demanda de 48 horas do transformador de 75 kVA, em azul, apresentada anteriormente na Figura 3.3, com a recarga da frota superposta à mesma.

Figura 3.4 – Curva de recarga do carro para 80 % da autonomia



Fonte: O autor, 2015.

Figura 3.5 – Carregamento da frota de carros e curva de demanda com a frota

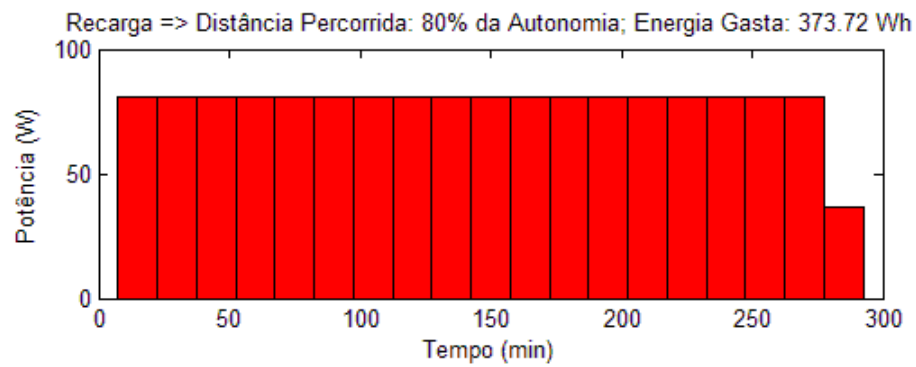


Fonte: O autor, 2015.

### Simulação com Bicicletas Elétricas

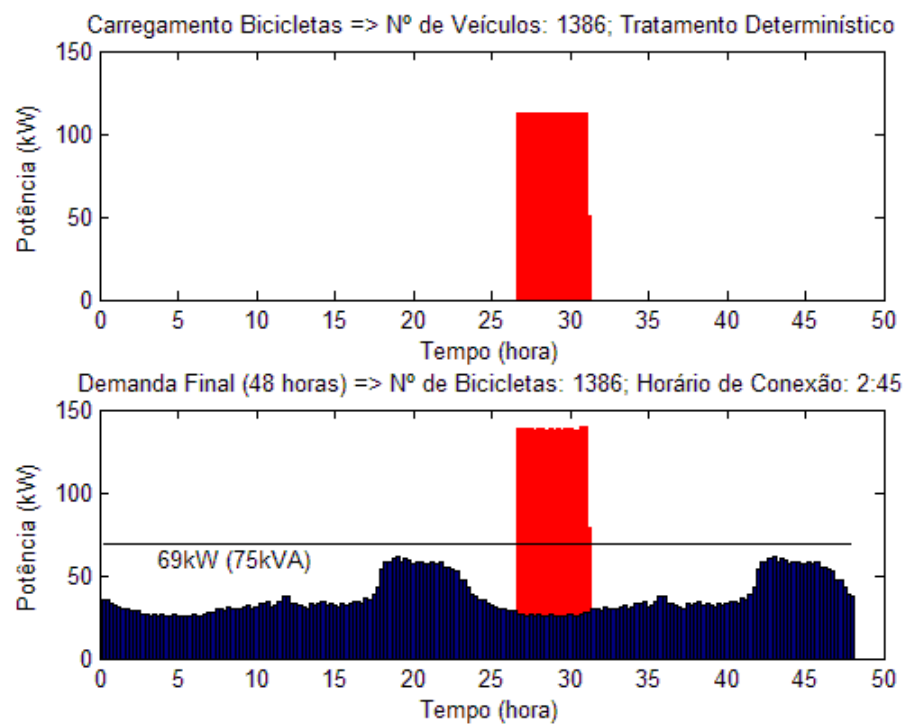
A Figura 3.6 apresenta a curva de recarga da bicicleta elétrica (LEV modelo S), na qual uma distância média percorrida da ordem de 19 km/dia corresponde ao consumo de cerca de 80 % da sua autonomia. Tais veículos simulam a frota de uma empresa de aluguel de bicicletas elétricas que também realizam recarga noturna utilizando-se da tarifa verde. A frota possui 1386 bicicletas idênticas. A Figura 3.7 apresenta a curva de carregamento, em vermelho, referente à recarga de toda a frota e a curva de demanda do transformador com a recarga da frota superposta à mesma.

Figura 3.6 – Curva de recarga da bicicleta para 80 % da autonomia



Fonte: O autor, 2015.

Figura 3.7 – Carregamento da frota de bicicletas e curva de demanda com a frota

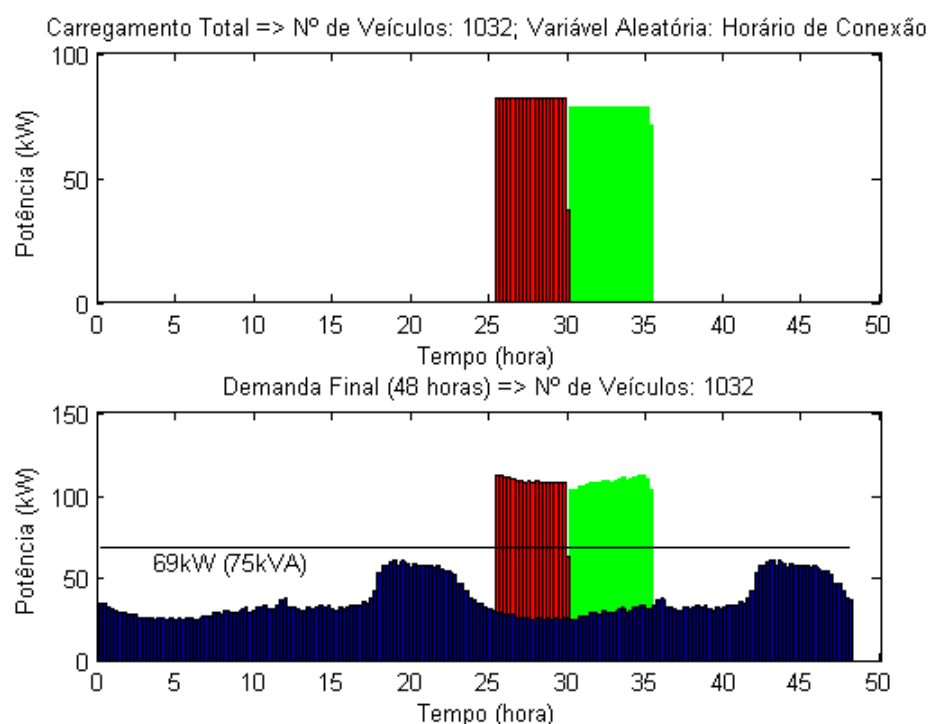


Fonte: O autor, 2015.

### Simulação com Carros Elétricos e Bicicletas Elétricas

A Figura 3.8 apresenta o carregamento de ambas as frotas sendo conectadas em horários diferentes durante o período noturno, bem como a superposição destas na curva de demanda do transformador. Neste caso, as distâncias percorridas pelos veículos antes da recarga e, conseqüentemente, suas curvas de recarga e de carregamento, continuam sendo as mesmas apresentadas nas simulações das figuras 3.4 a 3.7, porém, nesta simulação, o número de veículos conectados de cada frota foi de 24 carros e 1008 bicicletas.

Figura 3.8 – Carregamento das frotas e curva de demanda com as frotas



Fonte: O autor, 2015.

Nesta análise foram admitidas condições conservativas considerando-se a recarga simultânea dos veículos de cada frota. De acordo com as figuras 3.4 a 3.8, foram obtidos os resultados apresentados na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Resultados numéricos da simulação determinística

	<b>Carros</b>	<b>Bicicletas</b>	<b>Carros e Bicicletas</b>
Distância máxima percorrida pelos VEs	78,43 km	18,91 km	Carros: 78,43 km Bicicletas: 18,91 km
Número de VEs que percorrem a distância máxima	33	1386	Carros: 24 Bicicletas: 1008
Distância total percorrida pela frota	2588,1 km	26216 km	20948 km
Energia total gasta na recarga	560,67 kWh (2018,4 MJ)	517,97 kWh (1864,7 MJ)	784,47 kWh (2824,1 MJ)
Demanda máxima do transformador com a frota	135,58 kW (147,37 kVA)	139,64 kW (151,79 kVA)	112,20 kW (121,96 kVA)
Horário da demanda máxima do transformador	2:30	7:00	10:45
Fator de carga do transformador	0,445	0,419	0,621

Fonte: O autor, 2015.

Observa-se que mesmo tendo sido iniciada a recarga das frotas fora do horário de ponta, ainda assim resultaram em elevadas sobrecargas no transformador, durante a recarga da frota de carros e de bicicletas devido ao elevado número de veículos conectados ao mesmo tempo no tratamento probabilístico. Vale resaltar que este caso bastante conservativo é praticamente impossível de ocorrer no contexto das redes inteligentes de energia.

### 3.4 Resultados da Simulação Probabilística

Em uma situação real, os veículos percorrem distâncias diferentes e se conectam à rede em horários diferentes uns dos outros. A simulação mais realista, então, corresponde a realizar a recarga de forma aleatória com relação à distância percorrida e ao horário de conexão. Para isso, essas variáveis receberam um tratamento aleatório segundo uma função densidade de probabilidade lognormal, conforme explicado no capítulo 2. Em ambiente *smart grid*, a própria rede elétrica gerenciará o horário de início de recarga dos veículos de acordo com as necessidades dos clientes e a disponibilidade da rede, sem exceder a demanda máxima dos transformadores.

Sendo assim, para verificar a influência tanto da distância percorrida quanto do horário de conexão como variáveis aleatórias no carregamento dos veículos elétricos, inicialmente foram realizadas simulações em que apenas cada uma dessas variáveis recebeu tratamento probabilístico separadamente, para então simular o caso mais realista em que ambas as variáveis recebem tratamento probabilístico simultaneamente.

Para as simulações foram feitos 2000 sorteios com a frota de carros e 60 com a frota de bicicletas. A razão para a discrepância entre o número de sorteios para carros e para bicicletas é o fato de que está sendo simulada uma quantidade bem maior de bicicletas do que de carros e, assim, os esforços computacionais no MATLAB, para simular ambas as frotas, ficam equilibrados.

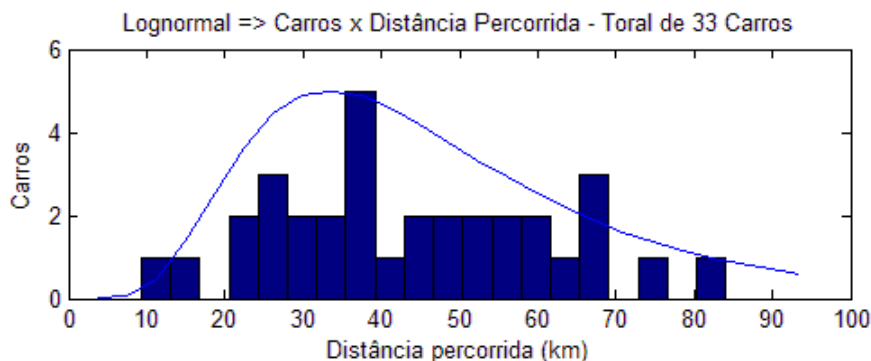
### **3.4.1 Variável Aleatória: Distância Percorrida**

A simulação da recarga de veículos elétricos com diferentes distâncias percorridas antes da conexão com a rede elétrica, ou seja, com diferentes estados de carga iniciais das baterias, foi realizada com a ferramenta computacional MATLAB considerando uma função densidade de probabilidade lognormal truncada à direita devido ao valor finito da autonomia do veículo associado à capacidade da bateria. Neste caso, cada veículo percorre uma distância diferente, mas todos ainda são conectados ao mesmo tempo.

#### **Simulação com Carros Elétricos**

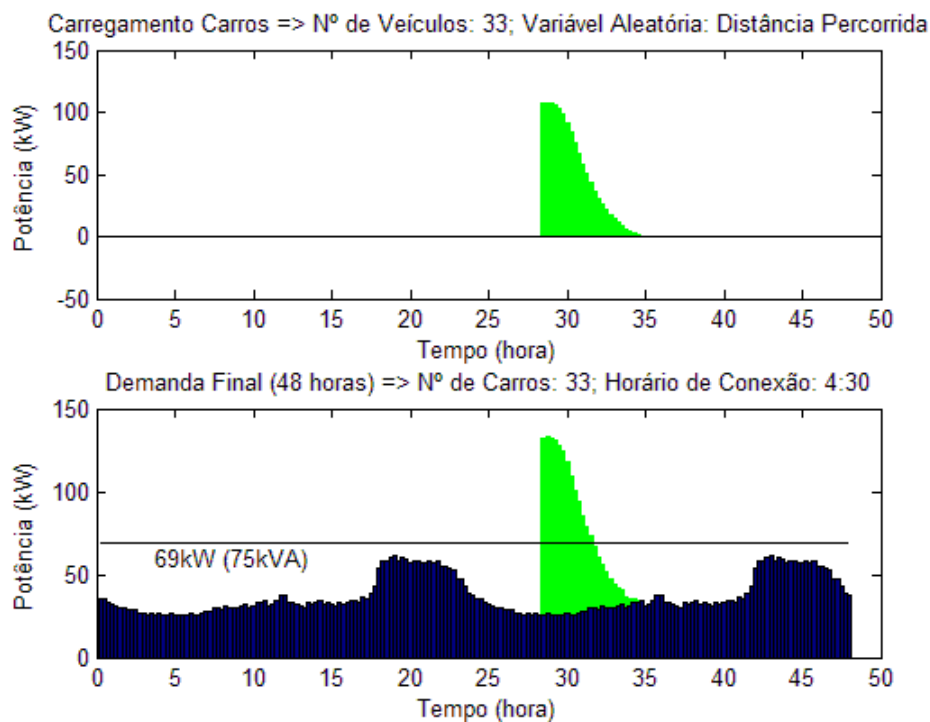
A Figura 3.9 apresenta uma amostra da distribuição das distâncias percorridas pelos 33 carros da frota, com a envoltória da respectiva lognormal. A Figura 3.10 mostra a demanda média do carregamento dos veículos, em verde, e a do transformador com a recarga da frota.

Figura 3.9 – Distribuição lognormal da distância percorrida pela frota de carros



Fonte: O autor, 2015.

Figura 3.10 – Carregamento da frota de carros e curva de demanda com a frota



Fonte: O autor, 2015.

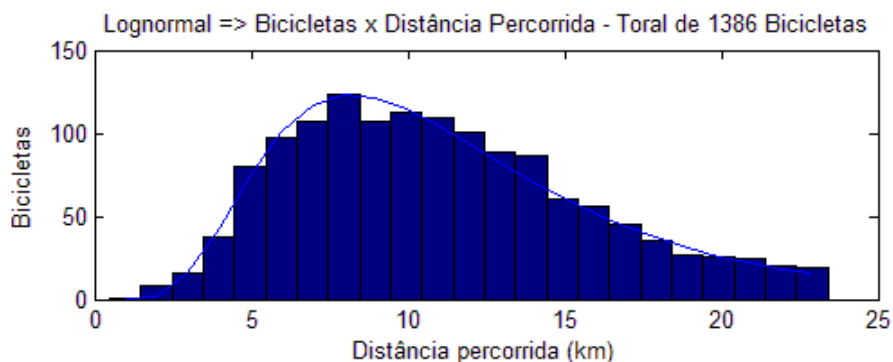
### Simulação com e Bicicletas Elétricas

A Figura 3.11 apresenta uma amostra da distribuição das distâncias percorridas pelas 1386 bicicletas da frota, com a envoltória da respectiva lognormal. A Figura 3.12 mostra a



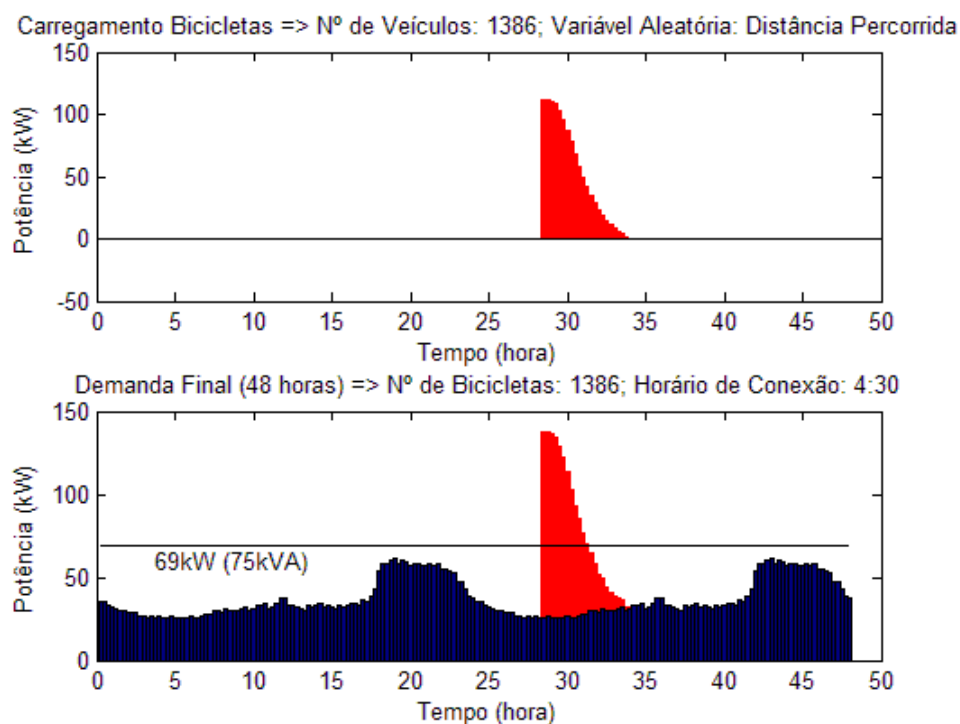
demanda média do carregamento dos veículos, em vermelho, e a do transformador com a recarga da frota.

Figura 3.11 – Distribuição lognormal da distância percorrida pela frota de bicicletas



Fonte: O autor, 2015.

Figura 3.12 – Carregamento da frota de carros e curva de demanda com a frota

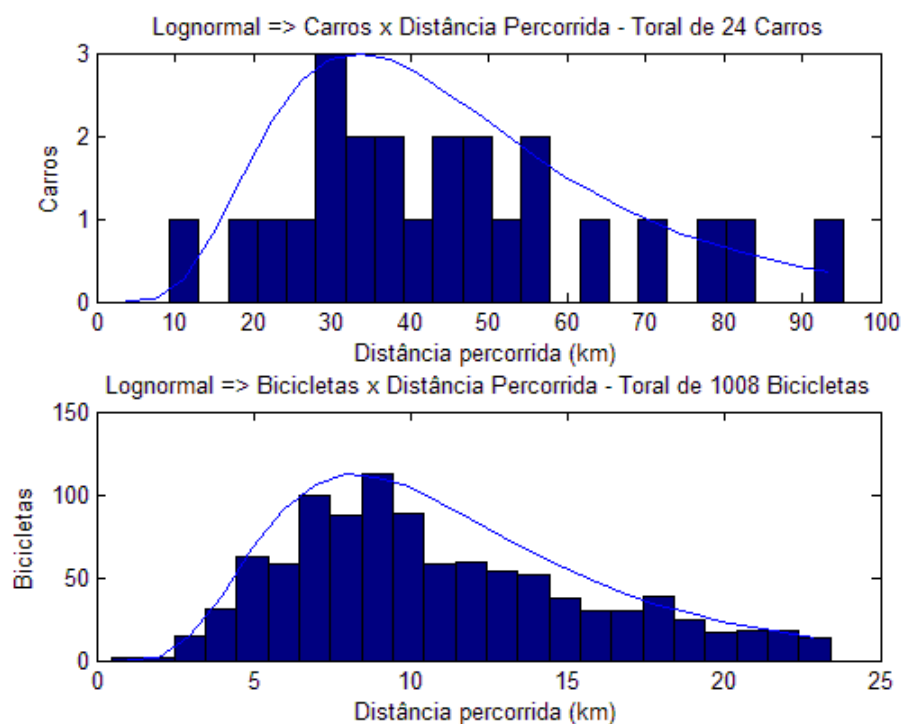


Fonte: O autor, 2015.

### Simulação com Carros Elétricos e Bicicletas Elétricas

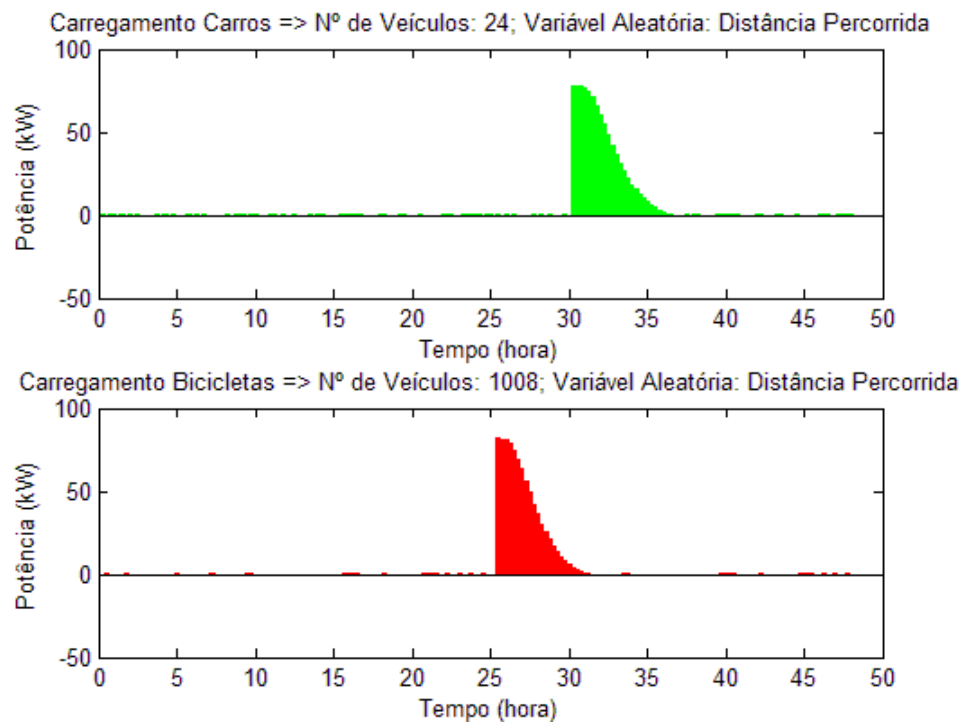
Neste caso, as distâncias percorridas pelos veículos antes da recarga estão apresentadas nas amostras das distribuições lognormais ilustradas na Figura 3.13, juntamente com as respectivas envoltórias lognormais. As curvas de carregamento resultantes são apresentadas na Figura 3.14. Na sequência, a Figura 3.15 apresenta a demanda média do carregamento de ambas às frotas conectadas em horários diferentes durante o período noturno e a superposição destas na curva de demanda do transformador. O número de veículos em cada frota, no entanto, foi reduzido para 24 carros e 1008 bicicletas, mantendo assim uma coerência com o caso determinístico para efeitos de comparação.

Figura 3.13 – Distribuição lognormal da distância percorrida pelas frotas



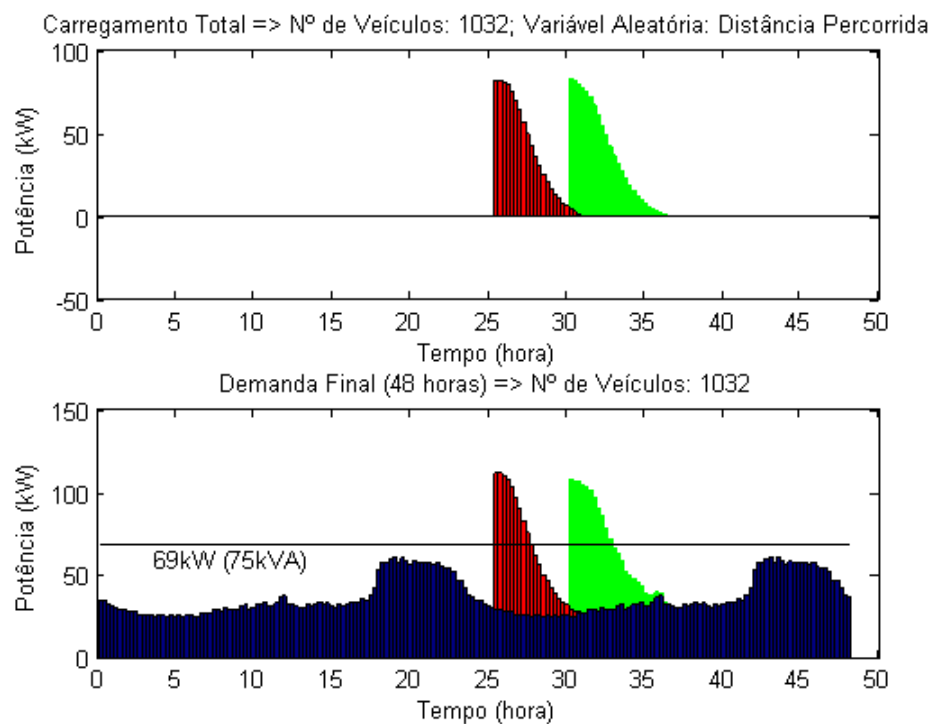
Fonte: O autor, 2015.

Figura 3.14 – Carregamento das frotas de carros e de bicicletas



Fonte: O autor, 2015.

Figura 3.15 – Carregamento das frotas e curva de demanda com as frotas



Fonte: O autor, 2015.

De acordo com as Figuras 3.9 a 3.15, foram obtidos os resultados apresentados na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Resultados numéricos da simulação probabilística da distância percorrida

	<b>Carros</b>	<b>Bicicletas</b>	<b>Carros e Bicicletas</b>
Distância máxima percorrida pelos VEs	37,35 km	7,96 km	Carros: 29,88 km Bicicletas: 8,96 km
Número de VEs que percorrem a distância máxima	5	123	Carros: 3 Bicicletas: 112
Distância total percorrida pela frota	1449,1 km	15329 km	12094,5 km
Energia total gasta na recarga	319,08 kWh (1148,7 MJ)	293,82 kWh (1057,7 MJ)	444,28 kWh (1599,4 MJ)
Demanda máxima do transformador com a frota	133,24 kW (144,82 kVA)	137,67 kW (149,96 kVA)	111,40 kW (121,09 kVA)
Horário da demanda máxima do transformador	4:45	4:45	1:45
Fator de carga do transformador	0,377	0,357	0,498

Fonte: O autor, 2015.

De forma análoga ao caso determinístico, mesmo tendo sido iniciada a recarga das frotas fora do horário de ponta, ainda assim os resultados da simulação probabilística indicam elevadas sobrecargas no transformador durante a recarga das frotas de carros e de bicicletas. Porém, o fato da variável distância percorrida apresentar um comportamento aleatório implicou em uma redução no tempo de sobrecarga do transformador e, conseqüentemente, produziu uma elevação de temperatura menos danosa à vida útil do mesmo.

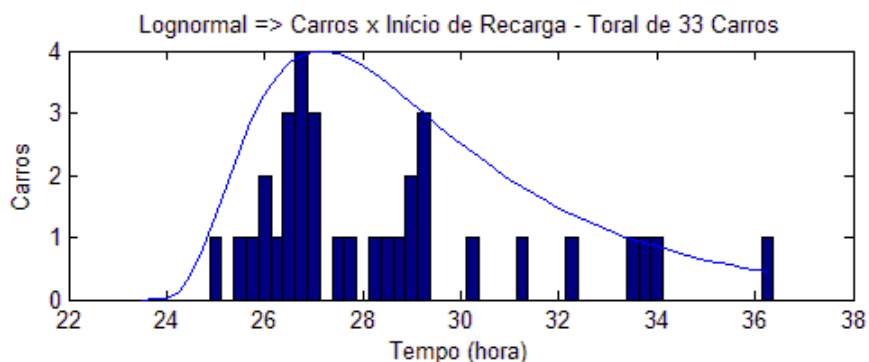
### 3.4.2 Variável Aleatória: Horário de Conexão

Neste caso, cada veículo da mesma frota inicia sua recarga em horários diferentes, mas voltam a percorrer a mesma distância referente a 80 % de suas autonomias, ou seja, suas curvas de recarga são as mesmas apresentadas nas Figuras 3.4 e 3.6.

### Simulação com Carros Elétricos

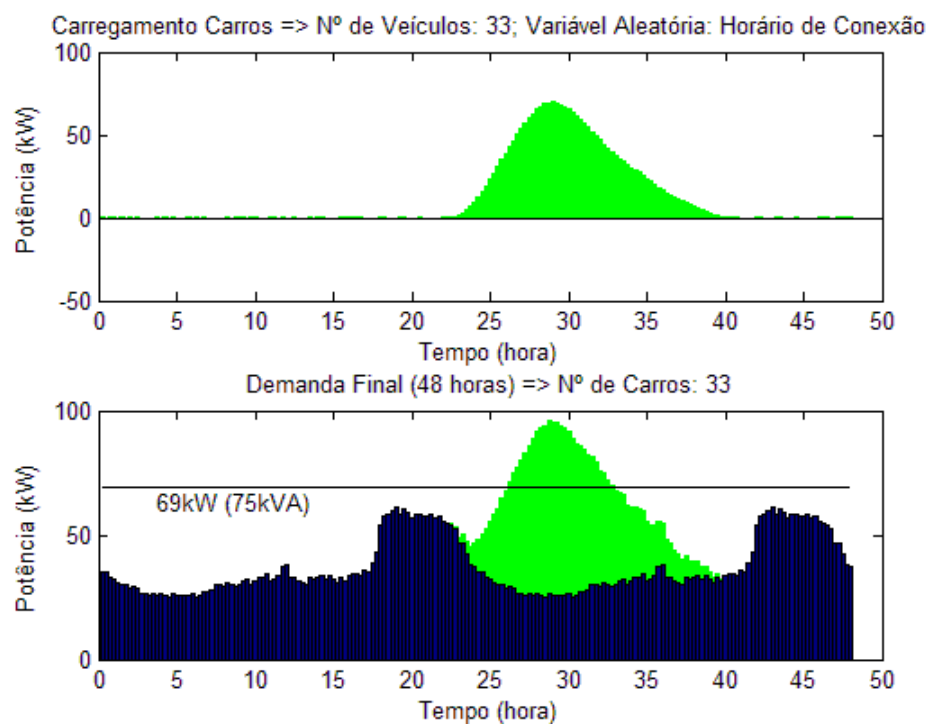
A Figura 3.16 apresenta uma amostra da distribuição dos horários de conexão dos 33 carros da frota, com a envoltória da respectiva lognormal. A Figura 3.17 mostra a demanda média do carregamento dos veículos, em verde, e a do transformador com a recarga da frota.

Figura 3.16 – Distribuição lognormal do horário de conexão da frota de carros



Fonte: O autor, 2015.

Figura 3.17 – Carregamento da frota de carros e curva de demanda com a frota

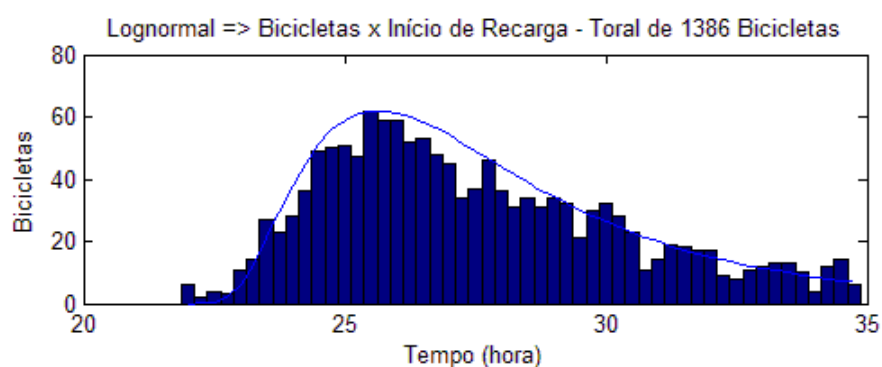


Fonte: O autor, 2015.

## Simulação com Bicicletas Elétricas

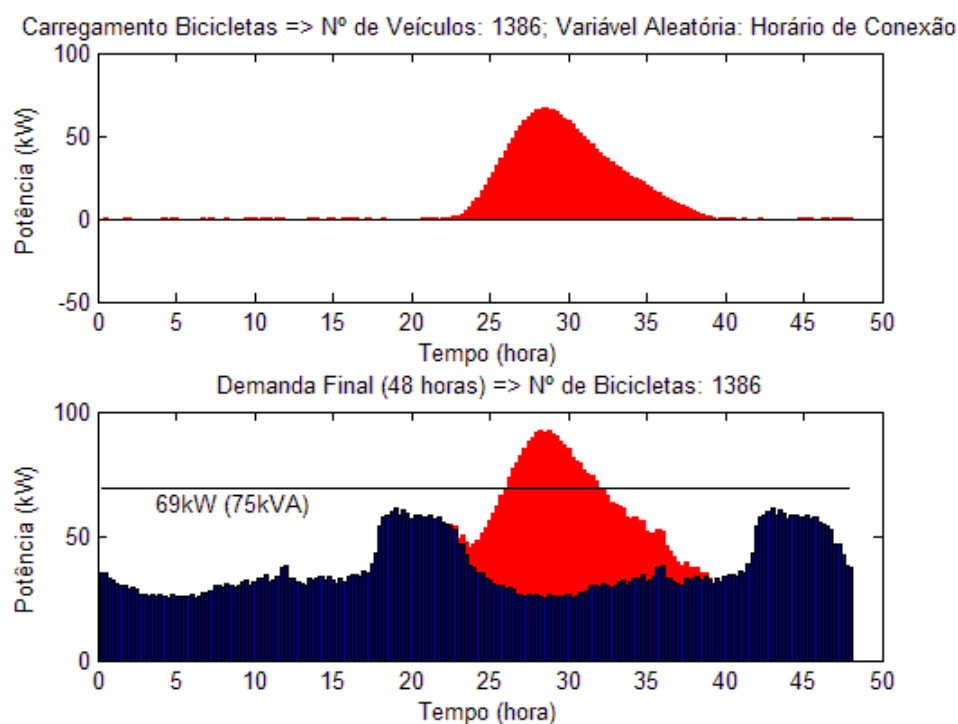
A Figura 3.18 apresenta uma amostra da distribuição dos horários de conexão das 1386 bicicletas da frota, com a envoltória da respectiva lognormal. A Figura 3.19 mostra a demanda média do carregamento dos veículos, em vermelho, e a do transformador com a recarga da frota.

Figura 3.18 – Distribuição lognormal do horário de conexão da frota de bicicletas



Fonte: O autor, 2015.

Figura 3.19 – Carregamento da frota de bicicletas e curva de demanda com a frota

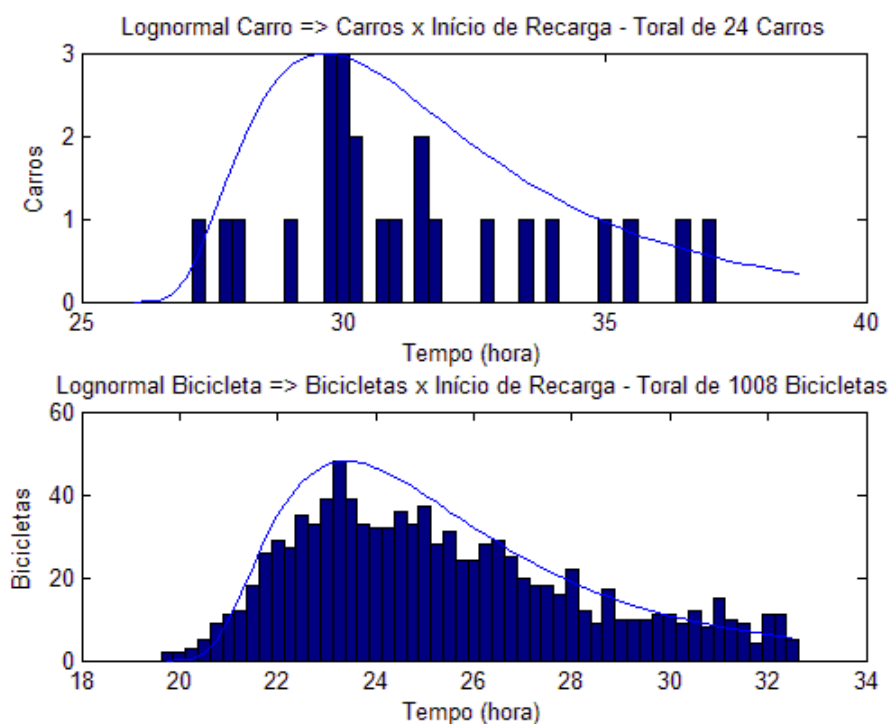


Fonte: O autor, 2015.

### Simulação com Carros Elétricos e Bicicletas Elétricas

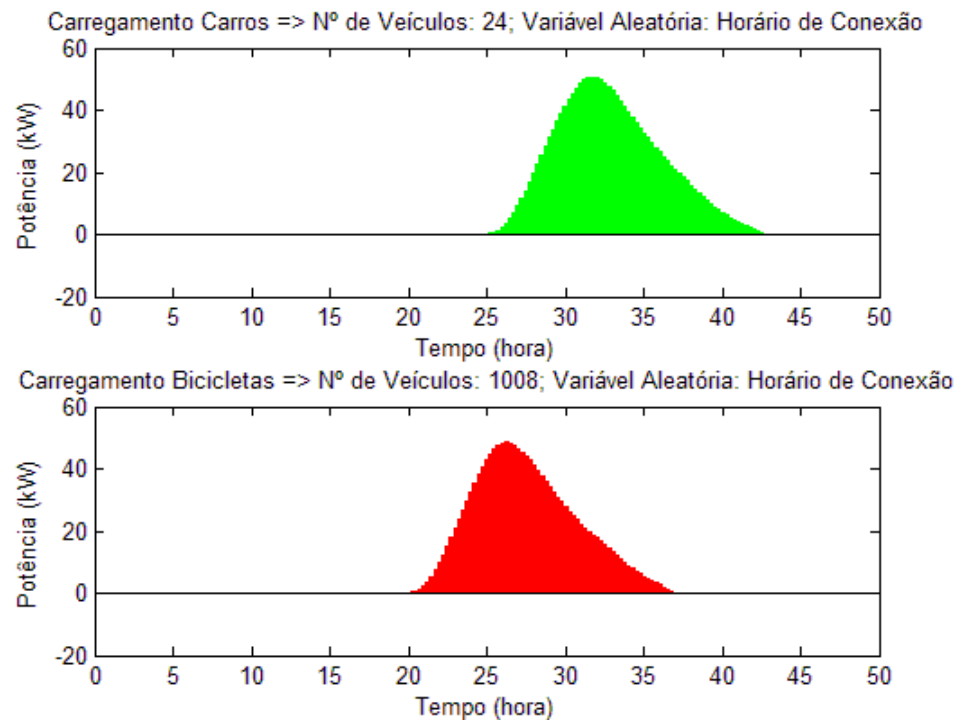
Neste caso, os horários de conexão dos veículos à rede elétrica estão apresentados nas amostras das distribuições lognormais da Figura 3.20, bem como as envoltórias das respectivas lognormais. As respectivas curvas de carregamento são as apresentadas na Figura 3.21. A Figura 3.22 apresenta a demanda média do carregamento de ambas às frotas e a superposição destas na curva de demanda do transformador. A concentração das curvas de carregamento no período de demanda baixa do transformador e a defasagem entre elas reduz a demanda máxima e aumenta o fator de carga. Visando manter a coerência com as simulações anteriores o número de veículos em cada frota foi reduzido para 24 carros e 1008 bicicletas.

Figura 3.20 – Distribuição lognormal do horário de conexão das frotas



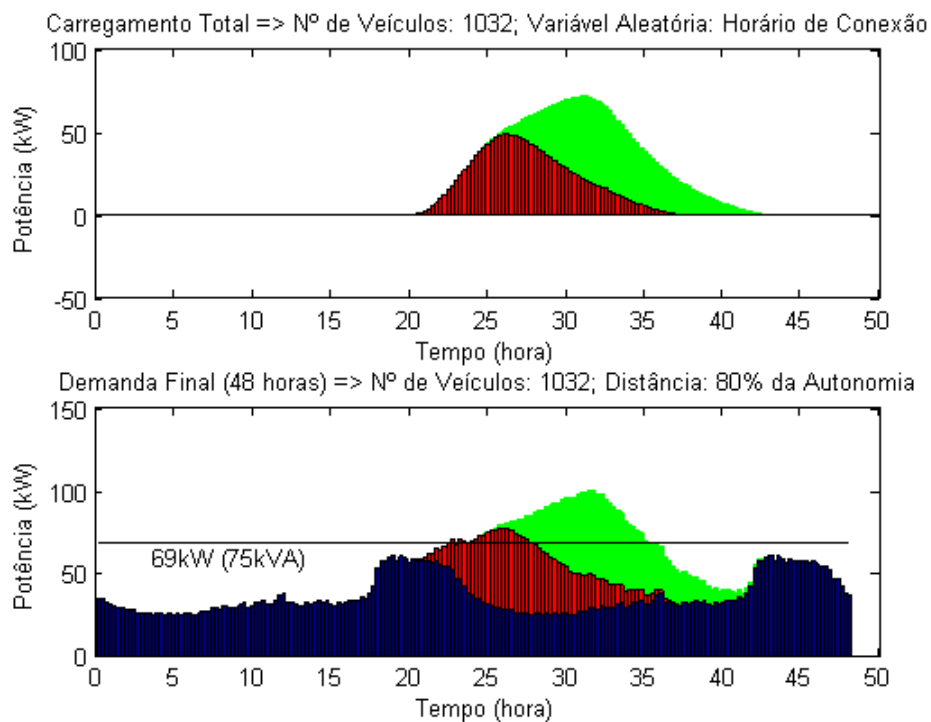
Fonte: O autor, 2015.

Figura 3.21 – Carregamento das frotas de carros e de bicicletas



Fonte: O autor, 2015.

Figura 3.22 – Carregamento das frotas e curva de demanda com as frotas



Fonte: O autor, 2015.



De acordo com as figuras 3.16 a 3.22, foram obtidos os resultados apresentados na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 – Resultados numéricos da simulação probabilística do horário de conexão

	<b>Carros</b>	<b>Bicicletas</b>	<b>Carros e Bicicletas</b>
Horário de máxima conexão de VEs	1:15	1:30	Carros: 4:30 Bicicletas: 23:15
Número máximo de VEs que se conectam simultaneamente	4	62	Carros: 3 Bicicletas: 48
Distância total percorrida pela frota	2588,1 km	26216 km	20948 km
Energia total gasta na recarga	560,67 kWh (2018,4 MJ)	517,97 kWh (1864,7 MJ)	784,47 kWh (2824,1 MJ)
Demanda máxima do transformador com a frota	95,79 kW (104,12 kVA)	92,39 kW (100,42 kVA)	100,22 kW (108,94 kVA)
Horário da demanda máxima do transformador	5:15	4:45	7:30
Fator de carga do transformador	0,630	0,634	0,695

Fonte: O autor, 2015.

Assim como na simulação determinística, mesmo tendo sido iniciada a recarga das frotas fora do horário de ponta, observam-se sobrecargas elevadas no transformador durante a recarga das frotas. Porém, percebe-se que o fato da variável horário de conexão apresentar um comportamento aleatório levou a uma redução na demanda máxima do transformador e, consequentemente, a uma menor elevação de temperatura, preservando a vida útil do mesmo.

### 3.4.3 Variáveis Aleatórias: Distância Percorrida e Horário de Conexão

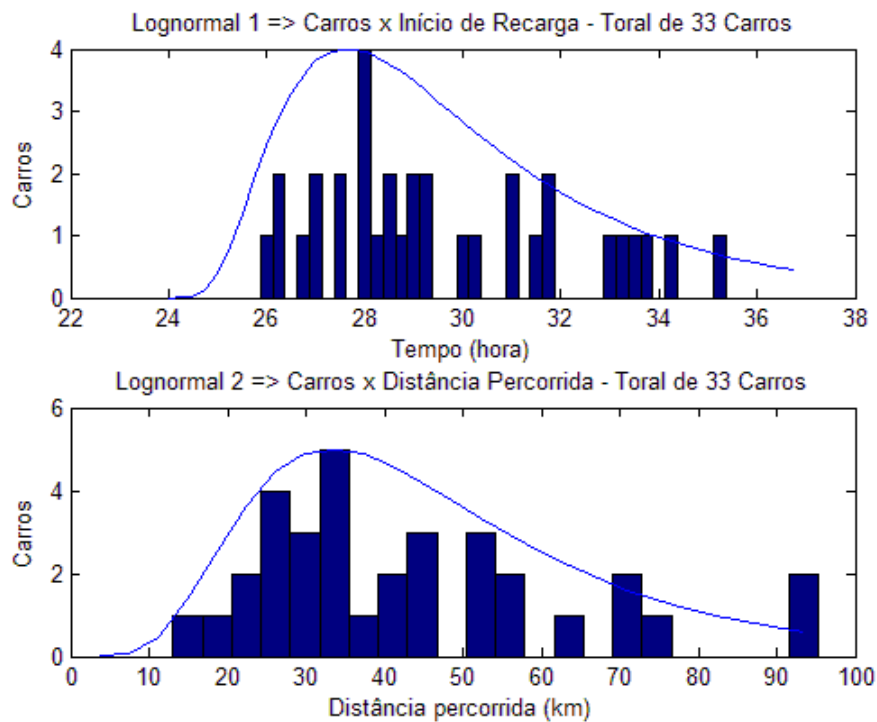
Esta simulação apresenta a influência simultânea das variáveis aleatórias distância percorrida e horário de conexão. Neste caso, veículos da mesma frota percorrem distâncias diferentes e iniciam suas recargas em horários diferentes. Portanto, trata-se de uma simulação mais próxima da condição real de condução e recarga de veículos elétricos. Vale destacar que nas simulações realizadas admitiu-se que as distâncias percorridas e os horários de conexão são variáveis aleatórias independentes. A referida simulação foi realizada com a ferramenta

computacional MATLAB considerando as mesmas funções densidade de probabilidade lognormal apresentadas nos casos anteriores para as respectivas variáveis.

### Simulação com Carros Elétricos

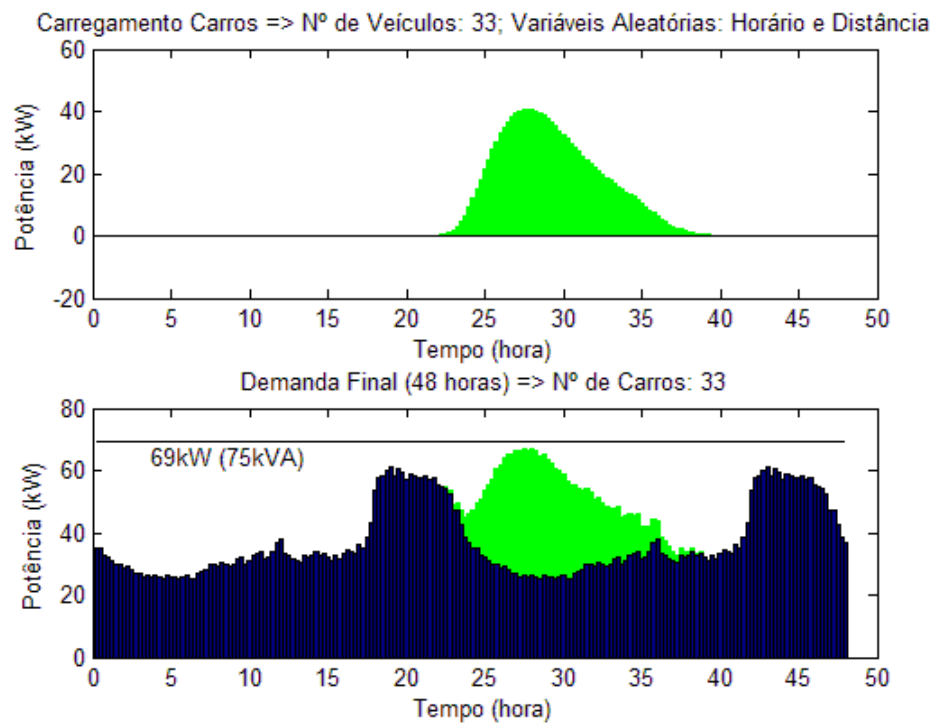
A Figura 3.23 apresenta uma amostra da distribuição dos horários de conexão e uma amostra das distâncias percorridas para os 33 carros da frota com as envoltórias das respectivas lognormais. A superposição da demanda média resultante do carregamento da frota veicular na demanda do transformador é ilustrada na Figura 3.24.

Figura 3.23 – Lognormais do horário de conexão e da distância percorrida para os carros



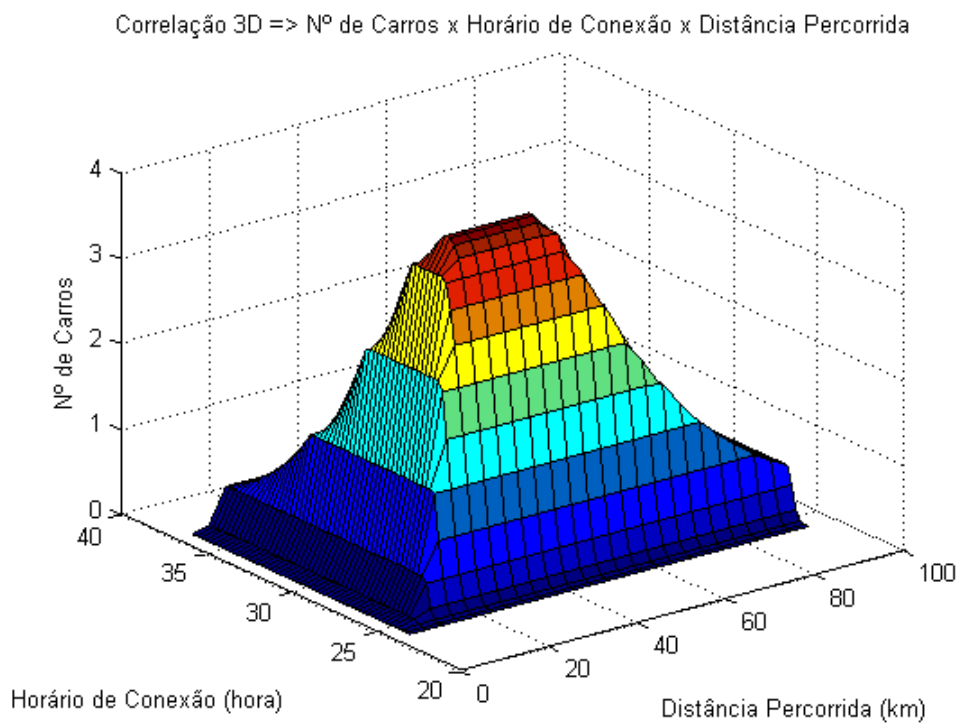
Fonte: O autor, 2015.

Figura 3.24 – Carregamento da frota de carros e curva de demanda com a frota



Fonte: O autor, 2015.

Figura 3.25 – Distribuição conjunta das distâncias percorridas e dos horários de conexão



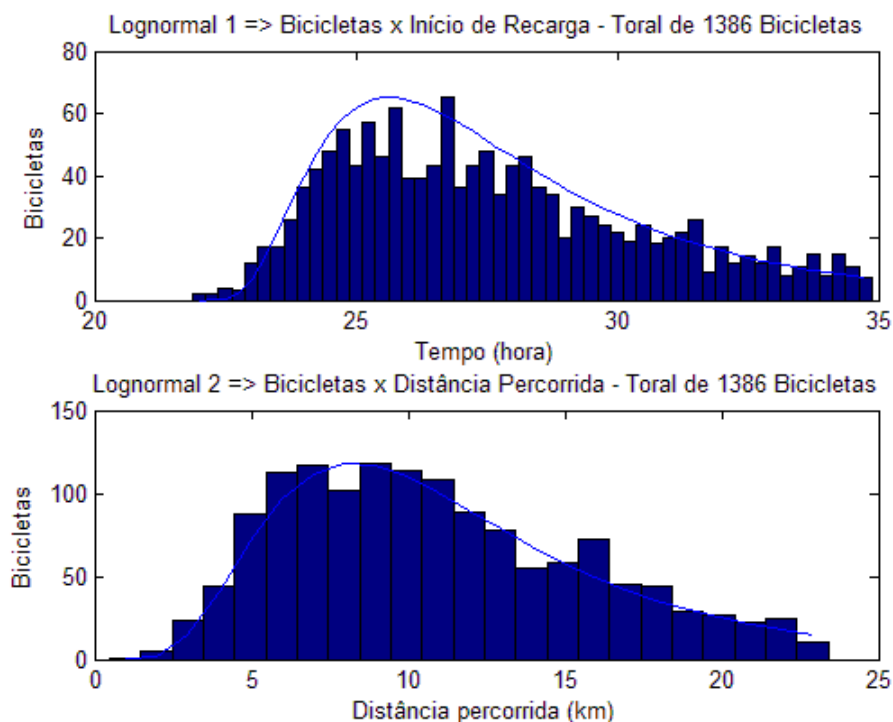
Fonte: O autor, 2015.

A distribuição conjunta dos horários de conexão e das distâncias percorridas é ilustrada na Figura 3.25, ou seja, a figura apresenta a distribuição do número de veículos que percorrem a mesma distância e, simultaneamente, iniciam as recargas no mesmo horário de conexão à rede.

### Simulação com Bicicletas Elétricas

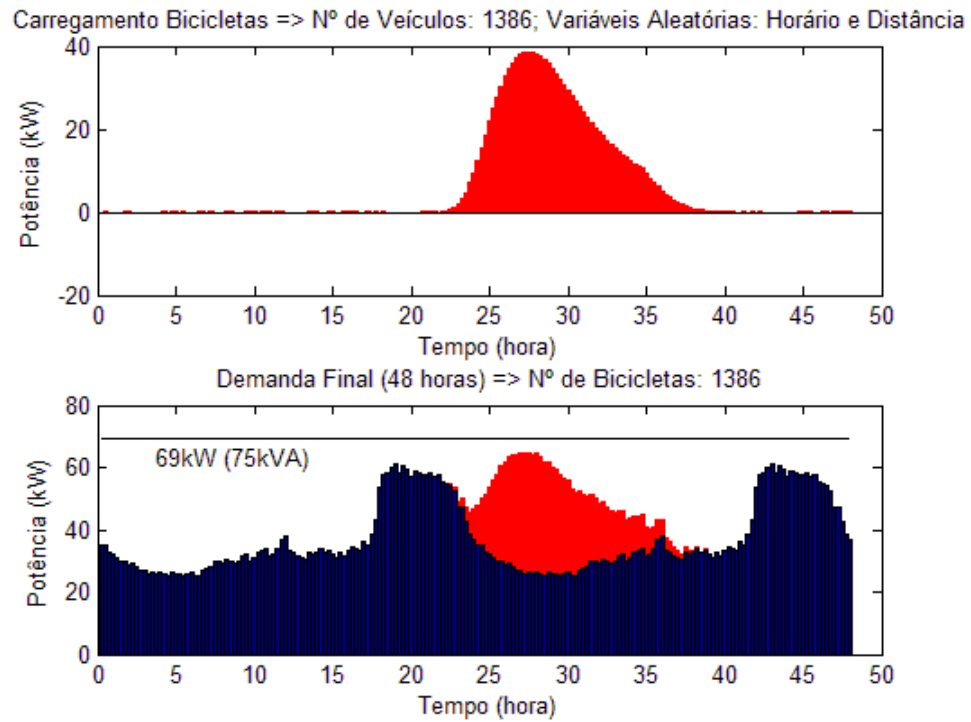
A Figura 3.26 apresenta uma amostra da distribuição dos horários de conexão e uma amostra das distâncias percorridas para as 1386 bicicletas da frota com as envoltórias das respectivas lognormais. A Figura 3.27 mostra a demanda média do carregamento da frota de bicicletas, em vermelho, e a superposição desta na demanda do transformador.

Figura 3.26 – Lognormais do horário de conexão e da distância percorrida para as bicicletas



Fonte: O autor, 2015.

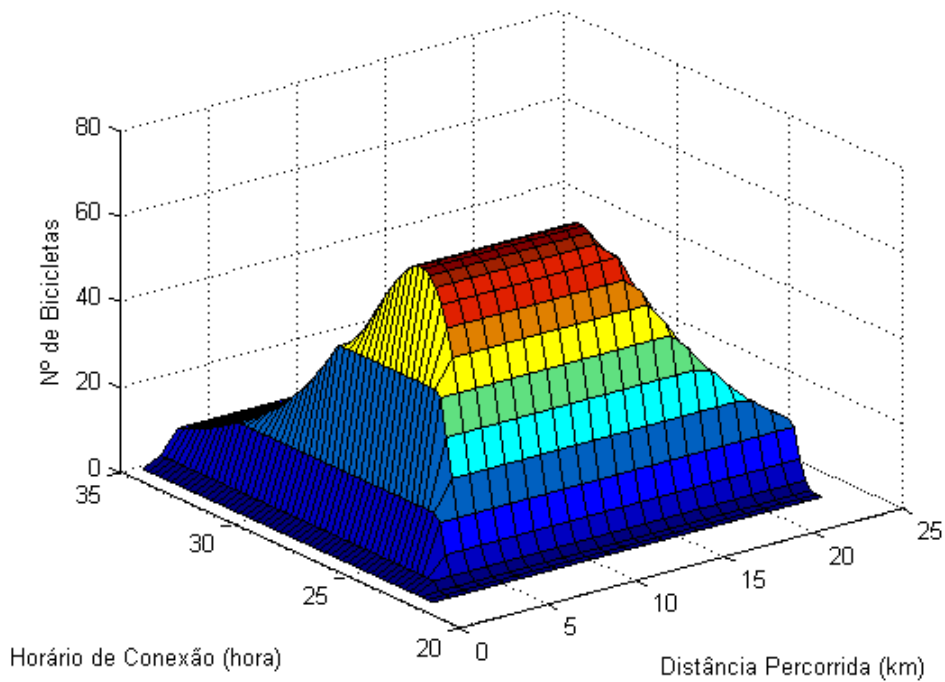
Figura 3.27 – Carregamento da frota de bicicletas e curva de demanda com a frota



Fonte: O autor, 2015.

Figura 3.28 – Distribuição conjunta das distâncias percorridas e dos horários de conexão

Correlação 3D => Nº de Bicicletas x Horário de Conexão x Distância Percorrida



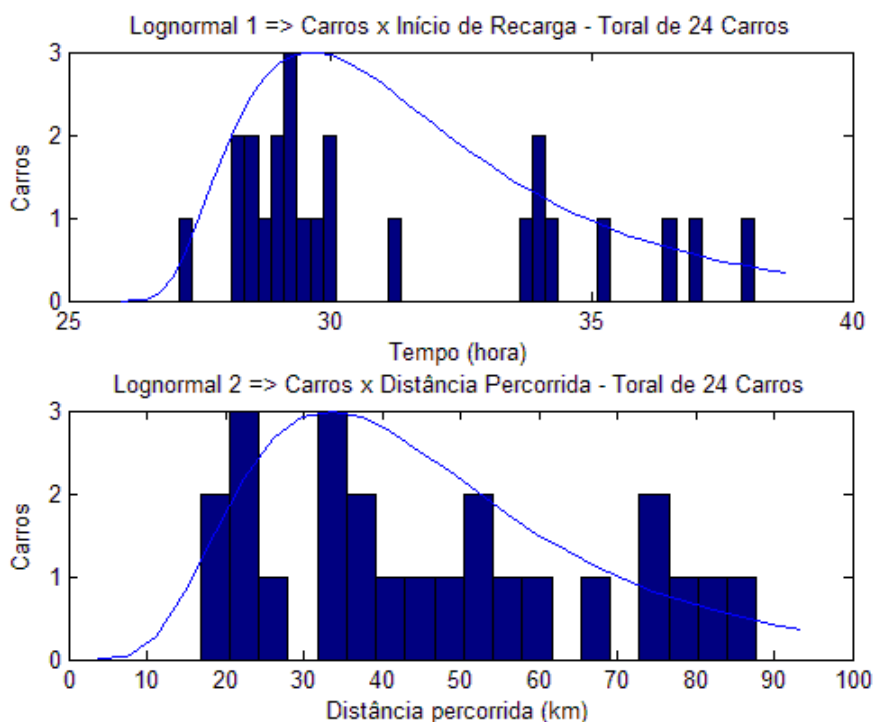
Fonte: O autor, 2015.

A distribuição conjunta dos horários de conexão e das distâncias percorridas é ilustrada na Figura 3.28, ou seja, a figura apresenta a distribuição do número de veículos que percorrem a mesma distância e, simultaneamente, iniciam as recargas no mesmo horário de conexão à rede.

### Simulação com Carros Elétricos e Bicicletas Elétricas

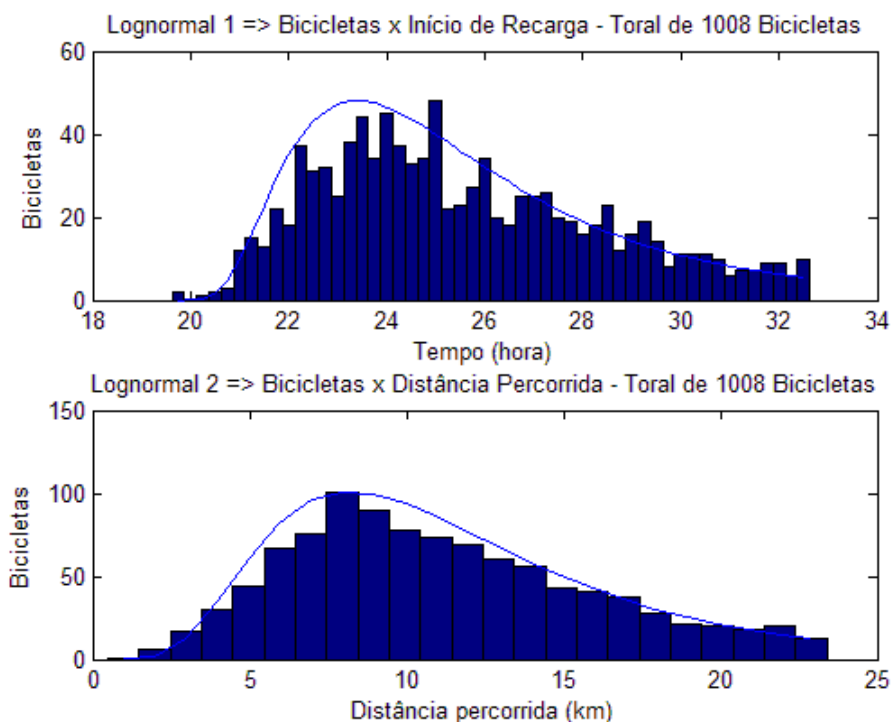
As Figuras 3.29 e 3.30 apresentam uma amostra da distribuição dos horários de conexão e uma amostra das distâncias percorridas para 24 carros e 1008 bicicletas das respectivas frotas, acompanhadas das respectivas densidades lognormais. A Figura 3.31 apresenta as respectivas curvas de carregamento para a frota de carros, em verde, e de bicicletas, em vermelho. Já a Figura 3.32 mostra a demanda média do carregamento das frotas e a superposição desta na demanda do transformador.

Figura 3.29 – Lognormais do horário de conexão e da distância percorrida para os carros



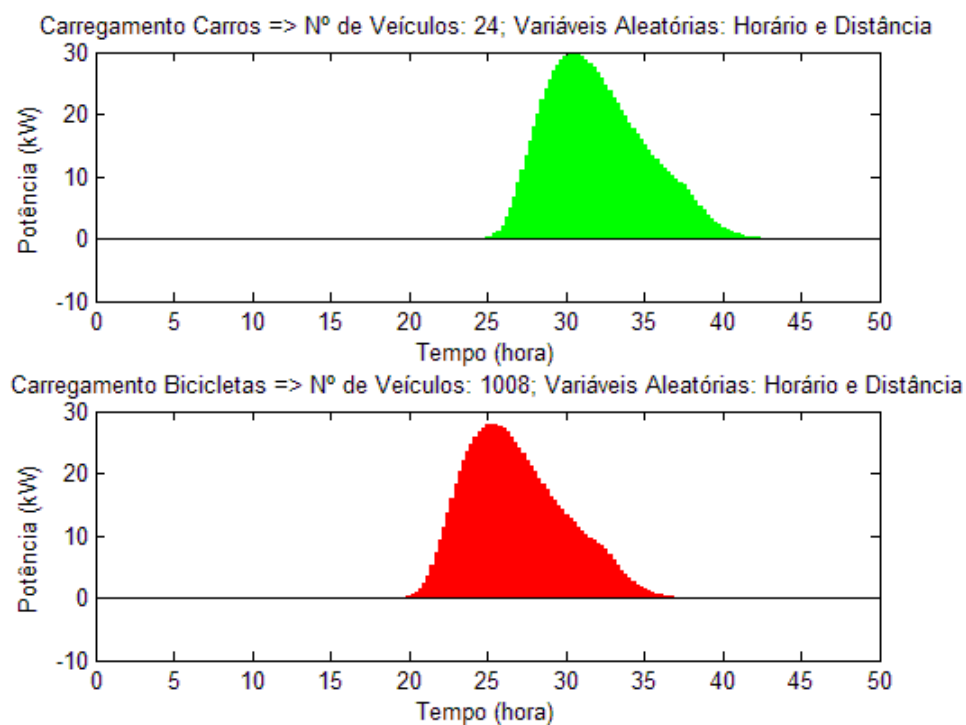
Fonte: O autor, 2015.

Figura 3.30 – Lognormais do horário de conexão e da distância percorrida para as bicicletas



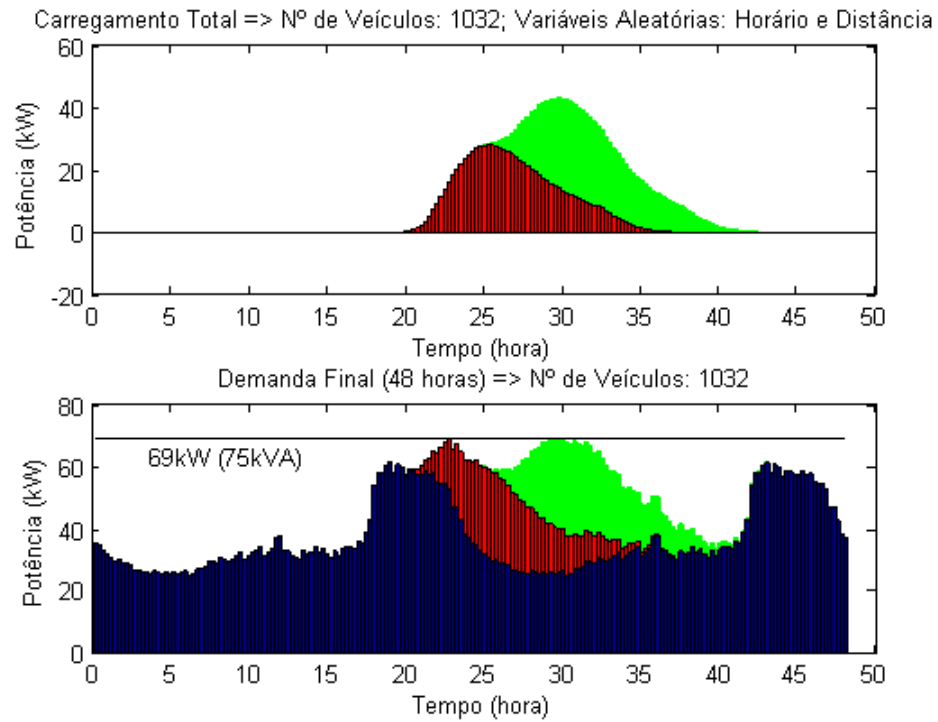
Fonte: O autor, 2015.

Figura 3.31 – Carregamento das frotas de carros e de bicicletas



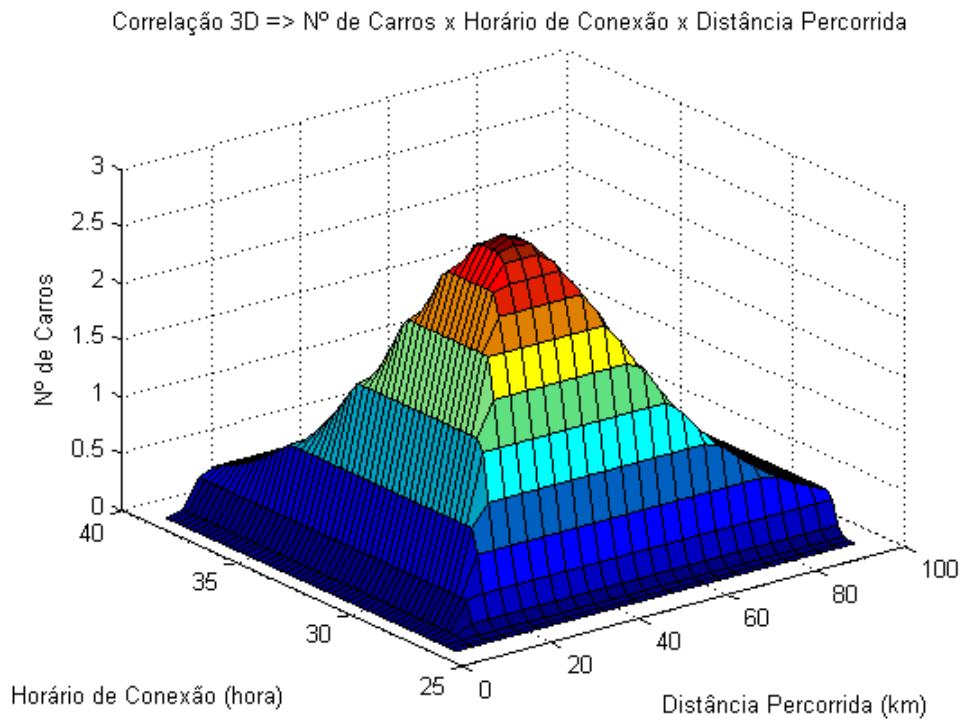
Fonte: O autor, 2015.

Figura 3.32 – Carregamento das frotas e curva de demanda com as frotas



Fonte: O autor, 2015.

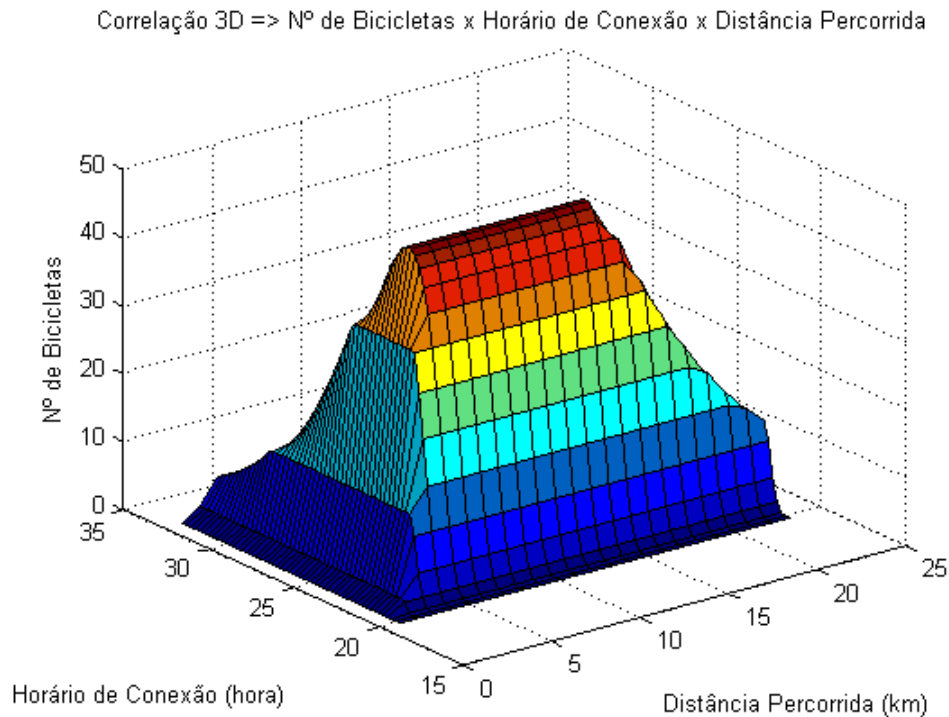
Figura 3.33 – Distribuição conjunta das distâncias percorridas e dos horários de conexão para a frota de carros elétricos



Fonte: O autor, 2015.



Figura 3.34 – Distribuição conjunta das distâncias percorridas e dos horários de conexão para a frota de bicicletas elétricas



Fonte: O autor, 2015.

A distribuição conjunta dos horários de conexão e das distâncias percorridas é ilustrada na Figura 3.33 para os carros elétricos e na Figura 3.34 para as bicicletas elétricas. Portanto, as Figuras supracitadas apresentam as distribuições do número de veículos que percorrem a mesma distância e, simultaneamente, iniciam as recargas no mesmo horário de conexão à rede.

De acordo com as figuras 3.23 e 3.34, foram obtidos os resultados apresentados na Tabela 3.5, onde é possível ver que, finalmente, ao efetuar simulações realistas em que os veículos percorrem distâncias diferentes e se conectam em horários diferentes, as mesmas não resultaram em sobrecargas no transformador durante a recarga das frotas de carros e de bicicletas, separadamente e simultaneamente.

A não sobrecarga no transformador faz com que a temperatura nos enrolamentos não atinja valores críticos e, conseqüentemente, a vida útil do transformador não é afetada, garantindo seu funcionamento normal com a penetração dos VEs, sem a necessidade de reforços na rede.

Tabela 3.5 – Resultados numéricos da simulação probabilística de ambas as variáveis

<b>Dados</b>	<b>Carros</b>	<b>Bicicletas</b>	<b>Carros e Bicycletas</b>
Distância máxima percorrida pelos VEs	33,61 km	8,96 km	Carros: 22.41 km Bicicletas: 7,96 km
Número de VEs que percorrem a distância máxima	5	118	Carros: 3 Bicicletas: 101
Horário de máxima conexão de VEs	2:00	2:45	Carros: 4:00 Bicicletas: 1:00
Número máximo de VEs que se conectam simultaneamente	4	65	Carros: 3 Bicicletas: 48
Distância total percorrida pela frota	1430,4 km	15073 km	12332 km
Energia total gasta na recarga	318,13 kWh (1145,3 MJ)	294,75 kWh (1061,1 MJ)	445,58 kWh (1604,1 MJ)
Demanda máxima do transformador com a frota	67,15 kW (72,99 kVA)	64,81 kW (70,45 kVA)	69,06 kW (75,07 kVA)
Horário da demanda máxima do transformador	4:00	3:30	6:00
Fator de carga do transformador	0,748	0,760	0,804

Fonte: O autor, 2015.

Os gráficos referentes às distribuições lognormais, tanto para a distância percorrida quanto para o horário de conexão, das simulações com a frota de carros não ficaram tão consistentes quanto os da frota de bicicletas, devido ao reduzido número de veículos comparativamente, mesmo utilizando-se da mesma função de densidade lognormal. Com uma quantidade maior de carros, os referidos gráficos ficariam tão expressivos quanto os da frota de bicicletas, porém, a demanda total, na simulação probabilística da distância percorrida e do horário de conexão destes veículos como variáveis aleatórias conjuntas, ultrapassaria a demanda nominal do transformador.

### 3.5 Precisão das Estimativas

Com a finalidade de avaliar a precisão das estimativas oriundas das simulações probabilísticas, tanto da distância percorrida quanto do horário de conexão, foi calculado, com o auxílio da ferramenta computacional MATLAB, o coeficiente de variação do estimador da

demanda média ( $CV$ ), em porcentagem, ponto a ponto para as duas variáveis aleatórias, de acordo com a equação 3.1.

$$CV = \frac{\sqrt{\text{var}(D_{\text{novo},1)/\text{simula}}}{D_{\text{novo\_media}}} \cdot 100 \quad (3.1)$$

Onde:  $\text{var}(D_{\text{novo},1)$  calcula a variância da demanda com os VEs, em cada simulação;

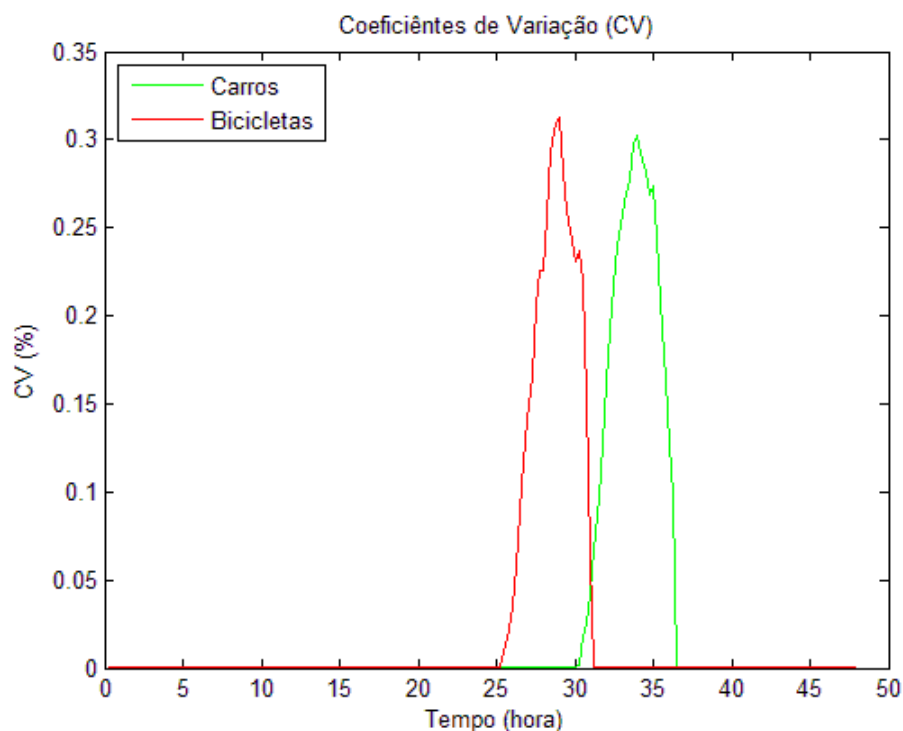
$\text{simula}$  é o número de simulações, ou o número de sorteios de cada simulação;

$D_{\text{novo\_media}}$  é a demanda média do transformador com os VEs.

Nos scripts do MATLAB, as variáveis  $D_{\text{novo}}$  e  $D_{\text{novo\_media}}$  podem receber os complementos  $\_carro$  e  $\_bike$  nos casos em que ambas as frotas são simuladas simultaneamente.

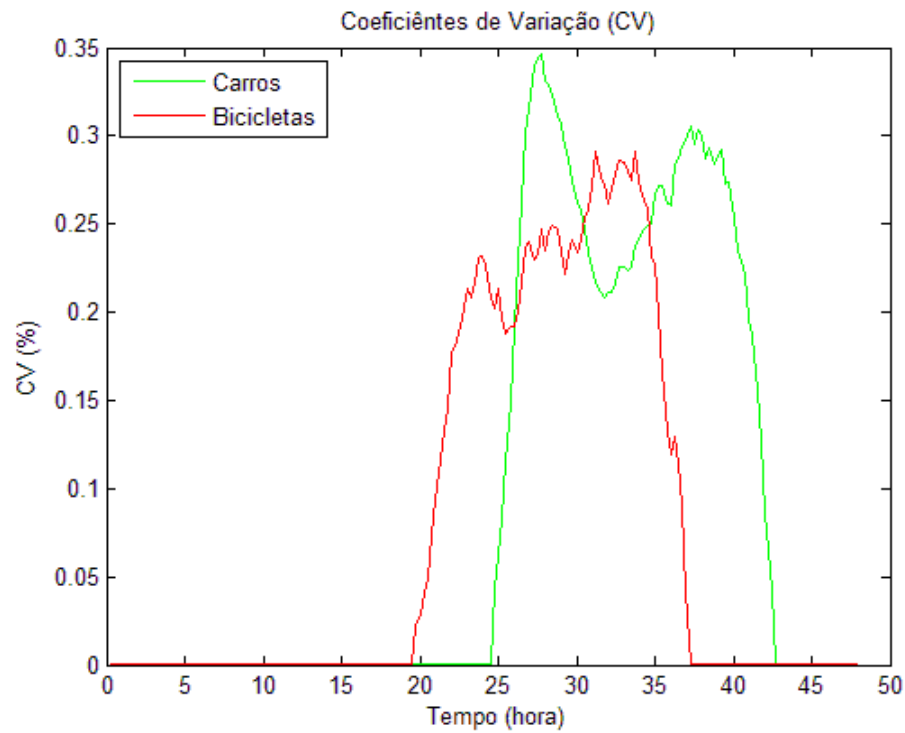
As Figuras 3.35, 3.36 e 3.37 ilustram o comportamento do  $CV$  da demanda para as variáveis aleatórias, respectivamente, apresentadas neste trabalho, nos casos das simulações probabilísticas para a frota composta por carros e bicicletas.

Figura 3.35 – CV para distância percorrida como variável aleatória



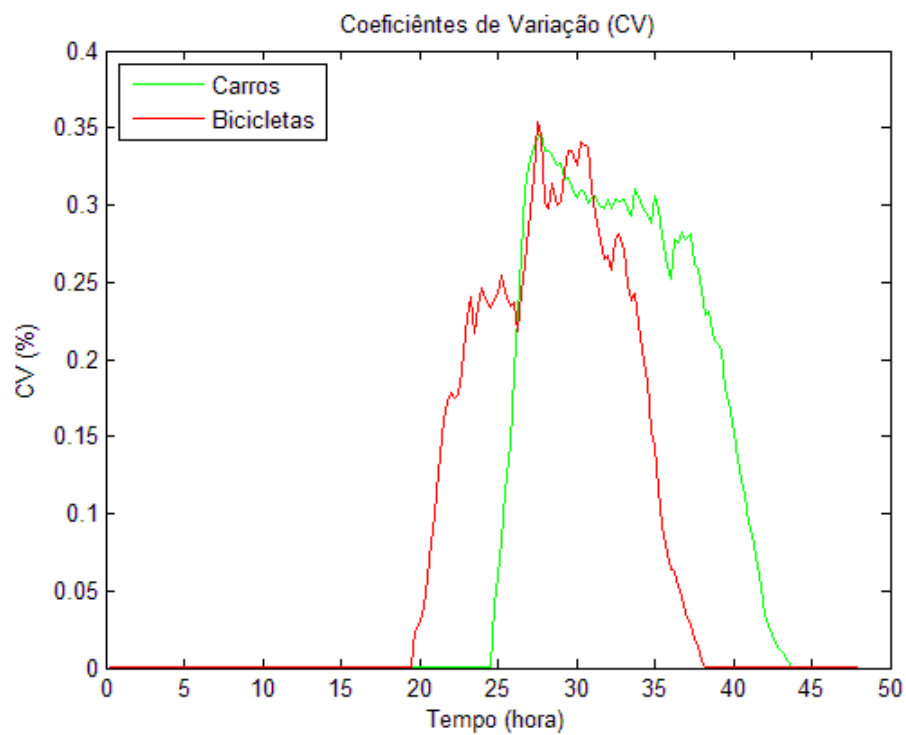
Fonte: O autor, 2015.

Figura 3.36 – CV para horário de conexão como variável aleatória



Fonte: O autor, 2015.

Figura 3.37 – CV para distância e horário como variáveis aleatórias



Fonte: O autor, 2015.

Os valores máximos dos coeficientes de variação ficaram entre 0,28 % e 0,37 % em todas as simulações. Isso mostra que os cálculos das demandas médias estão bem precisos para ambas as frotas e ambas as variáveis aleatórias.

### 3.6 Comparação dos Resultados das Simulações

No decorrer das simulações foi mostrado que a demanda máxima do transformador com o carregamento dos veículos foi diminuindo conforme os casos se aproximavam da situação real, primeiramente tornando a distância percorrida uma variável aleatória, depois o mesmo foi feito para o horário de conexão e, finalmente, o caso mais realista em que tanto a distância percorrida quanto o horário de conexão foram considerados variáveis aleatórias. Nesta última, então, conseguiu-se, com o mesmo número de veículos das simulações anteriores, um carregamento tal que a demanda máxima não ultrapassasse a potência nominal do transformador. A Tabela 3.6 abaixo apresenta a reprodução dos valores das demandas máximas do transformador em cada simulação.

Tabela 3.6 – Comparação da demanda máxima do transformador nas simulações

Simulação	Demanda Máxima do Transformador		
	Carros	Bicicletas	Carros e Bicicletas
Determinística	135,58 kW (147,37 kVA)	139,64 kW (151,79 kVA)	112,20 kW (121,96 kVA)
Probabilística da Distância Percorrida	133,24 kW (144,82 kVA)	137,67 kW (149,96 kVA)	111,40 kW (121,09 kVA)
Probabilística do Horário de Conexão	95,79 kW (104,12 kVA)	92,39 kW (100,42 kVA)	100,22 kW (108,94 kVA)
Probabilística de Ambas as Variáveis	67,15 kW (72,99 kVA)	64,81 kW (70,45 kVA)	69,06 kW (75,07 kVA)

Fonte: O autor, 2015.

Outro resultado interessante que merece destaque é o fator de carga do transformador com a recarga dos VEs. Conforme reproduzido na Tabela 3.7, este fator aumentou significativamente nas simulações onde o horário de conexão foi considerado uma variável aleatória, principalmente no caso realista onde tanto a distância percorrida quanto o horário de conexão receberam tratamento probabilístico.

Tabela 3.7 – Comparação do fator de carga do transformador nas simulações

Simulação	Fator de Carga do Transformador		
	Carros	Bicicletas	Carros e Bicicletas
Determinística	0,445	0,419	0,621
Probabilística da Distância Percorrida	0,377	0,357	0,498
Probabilística do Horário de Conexão	0,630	0,634	0,695
Probabilística de Ambas as Variáveis	0,748	0,760	0,804

Fonte: O autor, 2015.

É importante mencionar que o fator de carga do transformador antes das recargas dos veículos elétricos era de 0,604, logo, a recarga realista dos veículos aumentou o fator de carga do transformador mesmo aumentando a energia total drenada da rede. Isto ocorre porque, no ambiente de redes inteligentes de energia, a recarga dos veículos elétricos ocupará a região da curva de demanda do transformador onde a demanda é baixa, permitindo assim um melhor aproveitamento da energia e, principalmente, maior rentabilidade para as concessionárias de energia.

Com os resultados encontrados nas simulações podem-se aferir relações importantes, como por exemplo, o cálculo do consumo energético dos veículos. Para tanto, basta dividir a energia gasta, em MJ, pela distância percorrida, em km, pelas frotas. Em todos os casos, como esperado, o valor do consumo energético é o mesmo para cada frota, sendo do carro igual a 0,78 MJ/km e da bicicleta igual a 0,07 MJ/km. Principalmente no caso dos carros elétricos, este é um dado muito importante uma vez que o INMETRO classifica os veículos, em seu Programa Brasileiro de Etiquetagem – PBE [INMETRO, 2015], também pelo consumo energético em MJ/km. Desta forma veículos elétricos e a combustão interna podem ser comparados quanto a sua eficiência energética.

Outros exemplos de relação que se pode aferir dos resultados das simulações são os fatores de diversidade, em porcentagem, dos resultados das simulações probabilísticas em relação aos resultados da simulação determinística, para a distância percorrida ( $FD_d$ ), para a conexão dos VEs ( $FD_c$ ) e para a energia de recarga ( $FD_e$ ). Os cálculos destes fatores de diversidade são apresentados nas equações 3.2, 3.3 e 3.4, respectivamente.

$$FD_d = \frac{\text{Distância Percorrida pela Frota no Caso Probabilístico}}{\text{Distância Percorrida pela Frota no Caso Determinístico}} \cdot 100 \quad (3.2)$$

$$FD_c = \frac{N^{\circ} \text{ Máximo de VEs Conectados Juntos no Caso Probabilístico}}{N^{\circ} \text{ Máximo de VEs Conectados Juntos no Caso Determinístico}} \cdot 100 \quad (3.3)$$

$$FD_e = \frac{\text{Energia Gasta na Recarga da Frota no Caso Probabilístico}}{\text{Energia Gasta na Recarga da Frota no Caso Determinístico}} \cdot 100 \quad (3.4)$$

As Tabelas 3.8, 3.9 e 3.10 mostram os resultados dos cculos dos fatores de diversidade da distância percorrida, da conexão dos VEs e da energia de recarga, respectivamente.

Tabela 3.8 – Comparo do fator de diversidade da distância percorrida

Simulao	Fator de Diversidade da Distância Percorrida		
	Carros	Bicicletas	Carros e Bicicletas
Probabilística da Distância Percorrida	56,0%	58,5%	57,7%
Probabilística do Horário de Conexão	100%	100%	100%
Probabilística de Ambas as Variáveis	55,3%	57,5%	58,9%

Fonte: O autor, 2015.

Tabela 3.9 – Comparo do fator de diversidade da conexão dos VEs

Simulao	Fator de Diversidade da Conexão dos VEs		
	Carros	Bicicletas	Carros e Bicicletas
Probabilística da Distância Percorrida	100%	100%	Carros: 100% Bicicletas: 100%
Probabilística do Horário de Conexão	12,1%	4,5%	Carros: 12,5% Bicicletas: 4,8%
Probabilística de Ambas as Variáveis	12,1%	4,7%	Carros: 12,5% Bicicletas: 4,8%

Fonte: O autor, 2015.

Tabela 3.10 – Comparação do fator de diversidade da energia gasta

Simulação	Fator de Diversidade da Energia Gasta		
	Carros	Bicicletas	Carros e Bicicletas
Probabilística da Distância Percorrida	56,9%	56,7%	56,6%
Probabilística do Horário de Conexão	100%	100%	100%
Probabilística de Ambas as Variáveis	56,7%	56,9%	56,8%

Fonte: O autor, 2015.

Os exemplos a seguir, um para cada fator de diversidade, ajudam a interpretar melhor estes valores: a Tabela 3.8 informa que, na simulação probabilística da distância percorrida, a frota de carros percorreu 56% da distância total percorrida pela mesma frota na simulação determinística; a Tabela 3.9 informa que, na simulação probabilística do horário de conexão, o número máximo de bicicletas conectadas simultaneamente equivale a 4,5% do número de bicicletas conectadas simultaneamente na simulação determinística, que neste caso são todas as 1386 bicicletas; e a Tabela 3.10, por sua vez, informa que, na simulação probabilística de ambas as variáveis, a energia total gasta pela frota de carros e bicicletas equivale a 56,8% de toda a energia gasta na recarga da mesma frota na simulação determinística.



## CONSIDERAÇÕES FINAIS

### Conclusões

O trabalho apresentou uma metodologia de análise e tratamento dos efeitos da recarga de veículos elétricos rodoviários à bateria sobre os transformadores de distribuição. As simulações realizadas neste trabalho, decorrentes da metodologia proposta, evoluíram de modo a se obter no final um cenário realista imaginando-se os usuários percorrendo distâncias diferentes e as recargas sendo realizadas em ambiente de redes inteligentes de energia, onde o início da recarga de cada veículo é gerenciado convenientemente pela rede elétrica. Os resultados da metodologia se mostraram satisfatórios levando a concluir que os objetivos propostos foram atendidos, uma vez que, a metodologia permitiu avaliar a capacidade de uma rede de distribuição através da análise da demanda de um transformador de baixa tensão e atender a necessidade do planejamento a médio e longo prazo das redes quanto a demanda e energia requerida perante o processo estocástico da recarga de veículos elétricos. Além de destacar os benefícios ambientais e energéticos da penetração dos VEs no modal rodoviário.

Os cálculos efetuados, a partir de dados de medição e de placa dos carregadores, reproduzem de forma satisfatória o comportamento de veículos elétricos, visto o consumo energético do veículo usado como referência neste trabalho (0,78 MJ/km) é compatível com a faixa encontrada para os VEBs já em comercialização. O Tesla Model S tem um consumo de 0,79 MJ/km, o BYD E6 de 0,63 MJ/km e o BMW i3 de 0,46 MJ/km, por exemplo [ELECTROMAPS, 2015]. Com relação à energia, conclui-se então que, caso se adote outros carros para simulação, a metodologia fornecerá resultados conservativos. Já em relação ao comportamento da demanda, como a potência adotada é a que consta nos dados do fabricante dos carregadores, conclui-se que os resultados das simulações são bem precisos.

O modelo apresentado neste trabalho pode ser incorporado ao planejamento de redes de distribuição, no que tange principalmente aos transformadores de baixa tensão, dentro das metodologias para suas especificações. O conhecimento da carga oriunda do abastecimento dos veículos elétricos se faz necessária, principalmente para as concessionárias de energia, uma vez que esta nova tecnologia veicular se mostra promissora nas gerações presente e futura, onde o comprometimento com a preservação do meio ambiente está cada vez mais presente. Com isso, conclui-se que a metodologia desenvolvida neste trabalho se mostra uma

inovadora ferramenta de análise e planejamento de redes de distribuição com a introdução dos VEs, cuja utilização desta ferramenta se faz necessária pelas concessionárias de energia.

Devido aos resultados das análises energéticas globais e internas aos veículos elétricos, realizadas neste trabalho, pôde-se concluir que a eletrificação do setor de transportes tornará o sistema de abastecimento de energia deste setor mais eficiente, uma vez que as perdas totais serão consideravelmente minimizadas.

O atendimento aos veículos elétricos se torna importante para as empresas de distribuição de energia elétrica uma vez que há um aumento do fator de carga de 0,604 (sem recarga de VEs) para 0,804 (simulação com distância percorrida e horária de conexão como variáveis aleatórias simultâneas), e há também uma elevação do fator de potência, de acordo com as medições realizadas. Com o aumento dos fatores de carga e de potência, devido à recarga dos veículos elétricos, conclui-se que, conseqüentemente, as receitas das concessionárias de energia aumentarão, pois seus sistemas de distribuição de energia tornar-se-ão mais eficientes.

É importante salientar que, a partir dos resultados encontrados na simulação mais realista proposta nesta dissertação, pode-se desmistificar prognósticos baseados puramente em cálculos determinísticos ou de caráter qualitativo com os quais são manifestados pontos de vista desfavoráveis à inserção de veículos elétricos no Brasil. O transformador utilizado para análise da recarga de veículos elétricos é tipicamente utilizado para suprir áreas residenciais e possui uma potência, 75 kVA, capaz de abastecer em torno de 20 casas de consumo médio. Ficou demonstrado ser possível a conexão de mais 33 carros elétricos, ou seja, dessas 20 residências, 13 poderiam ter 2 carros elétricos cada e as outras 7 poderiam ter 1 carro cada, por exemplo. A mesma análise pode ser feita com relação às bicicletas simuladas. Conclui-se então que, em geral, a capacidade da rede elétrica de baixa tensão, com foco nos respectivos transformadores, possui condições de abastecer os veículos elétricos sem a necessidade iminente de reforços. Além disso, é natural e perceptível que a penetração de VEs se dará de forma gradativa.

De forma global, conclui-se então que o reabastecimento para recarga de veículos elétricos constitui um mercado propício às empresas de eletricidade, no contexto das *smart grids*, que direcionam o processo de recarga para horários convenientes, inclusive às empresas comerciais e industriais, que já possuem contratos de energia através de tarifa verde e azul, mediante políticas públicas adequadas que viabilizem economicamente a substituição dos VCIs de suas frotas por VEBs. Estas perspectivas estão em conformidade com a eficiência

energética e a redução das emissões atmosféricas preconizadas no documento “*The Future We Want*” elaborado por ocasião do evento internacional RIO + 20 e do qual o Brasil é signatário.

## Proposições

Visando o aprimoramento do modelo desenvolvido recomenda-se a realização de testes com respeito ao rendimento dos carregadores de bateria dos veículos elétricos, tendo em vista a sua influência sobre os cálculos realizados para as simulações da recarga de veículos elétricos em redes de distribuição.

Mostra-se também interessante que sejam acrescentados à metodologia apresentada elementos de modo que se examinem processos relativos ao que a literatura técnica convencionou denominar *Vehicle-To-Home* (V2H) e *Vehicle-To-Grid* (V2G) de forma a considerar o efeito do armazenamento de energia propiciado pelos veículos elétricos, respectivamente, no tocante ao domicílio do usuário e no tocante à comercialização desta energia em horários oportunos se disponível.

A fim de tornar o modelo de simulação ainda mais próximo da situação real, propõe-se a abordagem de métodos capazes de gerar a distribuição conjunta (distância percorrida e horário de conexão) a partir das distribuições marginais. Este método já existe e é denominado Cópula de Distribuições de Probabilidade.

Existe ainda a possibilidade da expansão dos modelos de análise de recarga de veículos elétricos visando à inclusão dos efeitos das componentes harmônicas tanto de tensão quanto de corrente, que podem provocar perda de capacidade dos transformadores de distribuição, segundo estudos realizados no LSPV / UERJ.

Devido à crescente penetração dos veículos elétricos e sua aceitação pela sociedade, faz-se necessário o aprimoramento dos modelos de medição de veículos elétricos para que, gradativamente, tanto os veículos híbridos quanto os VEBs, possam ser classificados e também figurarem no Programa Brasileiro de Etiquetagem do INMETRO, para que todos tenham selo CONPET de eficiência energética.

Ao longo deste trabalho, de acordo com estudos realizados no LSPV em conjunto com o Laboratório de Políticas Públicas e Justiça Fiscal (LAPPJUS) da UERJ constatou-se a urgência da alteração da carga tributária sobre veículos elétricos no Brasil. Atualmente é

inviável a comercialização destes veículos face a esta barreira considerada prejudicial ao setor de transporte rodoviário brasileiro.

Por fim, propõe-se o desenvolvimento de modelos de planejamento energético de longo prazo, com base na economia de combustíveis decorrente da penetração de veículos elétricos, que leve em conta a necessidade da energia elétrica a ser produzida concomitante ao ingresso da geração distribuída e a possibilidade de exportação de excedentes de petróleo e demais combustíveis destinados atualmente ao abastecimento de VCIs.

## REFERÊNCIAS

- ABNT. *NBR IEC 61851-1*: Sistema de Recarga Condutiva para Veículos Elétricos: Parte 1 – Requisitos Gerais. [S.I.]. 2013a.
- ABNT. *NBR IEC 61851-21*: Sistema de Recarga Condutiva para Veículos Elétricos: Parte 21 – Requisitos de Veículos Elétricos para a Conexão Condutiva a uma Alimentação em Corrente Alternada ou Contínua. Associação Brasileira de Normas Técnicas. [S.I.]. 2013b.
- ABNT. *NBR IEC 61851-22*: Sistema de Recarga Condutiva para Veículos Elétricos: Parte 22 – Estação de Recarga em Corrente Alternada para Veículos Elétricos. Associação Brasileira de Normas Técnicas. [S.I.]. 2013c.
- ABNT. *NBR 5410*: Instalações Elétricas de Baixa Tensão. Associação Brasileira de Normas Técnicas. [S.I.]. 2004 (corrigida em 2008).
- MTE. *NR 10*: Segurança em Instalações e Serviços em Eletricidade. Ministério do Trabalho e Emprego. [S.I.]. 1987 (atualizada em 2004).
- BIRD, R. B.; STEWART, W. E.; LIGHTFOOT, E. N., *Fenómenos de Transporte*. 2. ed. México. Limusa Wiley. 2006. 1062 p. ISBN: 968-18-6365-8.
- CHWIF, L.; MEDINA, A. C. *Modelagem e simulação de eventos discretos – Teoria e Aplicações*. 2. ed. São Paulo. Bravarte. 2007. 254 p. ISBN: 9788590597827.
- CONMETRO. *Regulamentação Metrológica*. Resolução n.º 01/82. Conselho Nacional de Metrologia, Normatização e Qualidade Industrial. Brasília. 1982.
- COSTA, E. *Frenagem Regenerativa Recupera até 95% da Energia*. Disponível em: <<http://www.verdesobrerdas.com.br/2014/07/frenagem-regenerativa-recupera-ate-95.html>>. Acesso em: 9 Jul. 2014.
- DOMINGUES, J. M.; PECORELLI PERES, L. A. Electric Vehicles: Energy Efficiency, Taxes and Public Policy in Brazil. *Law and Business Review of the Americas*. [S.I.]. v. 19. n. 1. f. 55-78. Winter 2013. ISSN – 1571-9537J.
- DOMINGUES, J. M.; PECORELLI PERES, L. A.; SEROA DA MOTTA, R. Environmental Regulation and Automotive Industrial Policies in Brazil. The case of “INOVAR-AUTO”. *Law and Business of Americas*. [S.I.]. v. 20. n. 3. f. 399-420. Summer 2014.
- ELECTROMAPS, Carros Elétricos. Disponível em: <<http://www.electromaps.com/coches-electricos>>. Acesso em: 22 Ago. 2015.
- FENABRAVE. *Anuário 2014*: O desempenho da distribuição automotiva no Brasil. Federação Nacional da Distribuição de Veículos Automotores. São Paulo. 2014.
- FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY JR, C.; UMANS, S. D. *Máquinas Elétricas*. 6. ed. Ed. Bookman. Porto Alegre. 2006. 648 p. ISBN 978-85-60031-04-7.

GRUPO ENEL. Ampla Energia e Serviços S.A. *Fornecimento de Energia Elétrica em Tensão Primária 15 kV*: Padrão de fornecimento de energia elétrica. Diretoria Técnica. Engenharia e Obras. [S.I.]. Out. 2007.

HAMMERSLEY, J. M.; HANDSCOMB, D. C. *Monte Carlo Methods*. New York. John Wiley & Sons. 1964. 184 p. ISBN 13: 9780416523409.

INMETRO. *Programa Brasileiro de Etiquetagem: Veículos automotores leves*. Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia. [S.I.]. 2015.

KAR, N. C. et al. Courting and Sparking. *Electrification Magazine*. [S.I.]. v. 1. n. 1. p. 21-31. Sep. 2013. ISSN 2325-5987.

LARMINIE, J.; LOWRY, J. *Electric Vehicle Technology Explained*. West Sussex. John Wiley & Sons. 2003. 296 p. ISBN 0-470-85163-5.

LIVI, C. P. *Fundamentos de Fenômenos de Transporte – Um Texto para Cursos Básicos*. Rio de Janeiro. LTC. 2004. 206 p.

MEYER, P. L. *Probabilidade - Aplicações à Estatística*. 2. ed. Rio de Janeiro. LTC. 2012. 426 p. ISBN 8521602944.

FREUND, J. E; MILLER, I. *Probability and Statistics for Engineers*. Prentice-Hall. Englewood Cliffs. c1965. 432 p.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. Empresa de Pesquisa Energética. *Balanço Energético Nacional 2014: Ano base 2013*. Rio de Janeiro. 2014. CDU: 620.9:553.04(81).

MOHAN, N.; UNDELAND, T. M.; ROBBINS, W. P. *Power Electronics: Converters, Applications, and Design*. 2nd ed. New York. John Wiley. 1995. 802 p.

ORR, J. A.; EMANUEL, S. M.; OBERG, K. W. Current Harmonic Generated by a Cluster of Electric Vehicles Battery Chargers. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*. Massachusetts. v. PAS-101. n. 3. Mar. 1982.

PAPOULIS, A.; PILLAI, S. U. *Probability, Random Variables and Stochastic Processes*. 4th ed. New York. McGraw-Hill. c2002. 837 p. ISBN 0-07-366011-6.

PECORELLI PERES, L. A.; LAMBERT-TORRES, G.; HORTA, L. A. N. Analysis and Discussion on Energy Supply to Non-Road Electric Vehicles in Brazil. In: IEEE POWER ENGINEERING SOCIETY - T&D 2002 LATIN AMERICA CONFERENCE. Mar. 2002. São Paulo.

PECORELLI PERES, L. A. et al. Analysis of the Use of Electric Vehicles by Electric Utilities Company Fleet in Brazil. *IEEE Latin America Transactions*. [S.I.]. v. 9. n. 7. Dec. 2011.

PECORELLI PERES, L. A. *Avaliação dos Impactos Energéticos e Ambientais da Introdução de Veículos Elétricos*. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia. Universidade Federal de Itajubá. Itajubá. 2000a.

PECORELLI PERES, L. A.; LAMBERT-TORRES, G.; HORTA, L. A. N. Considerations about Electric Vehicles Impacts on Daily Load and Environment. In: 4<sup>th</sup> CSCC-MCP-MCME 2000 WORLD MULTICONFERENCE WSES. July 2000b. Athens.

PECORELLI PERES, L. A.; PESSANHA, J. F. M. Avaliação de Desempenho de Veículos Elétricos em Frotas de Empresas Distribuidoras: Uma Proposta para o Planejamento Experimental. IV CONGRESSO DE INOVAÇÃO TECNOLÓGICA – CITENEL / ANEEL. 2007. Araxá.

PECORELLI PERES, L. A.; TORRES, G. L.; NOGUEIRA, L. A. H. Influências na Curva de Demanda Considerando-se o Recarregamento de Veículos Elétrico em uma Área Urbana. In: 4<sup>o</sup> ENCONTRO LUSO-AFRO-BRASILEIRO DE PLANEJAMENTO E EXPLORAÇÃO DE REDES DE ENERGIA – ELAB99. Jun. 1999. Rio de Janeiro. v. 1. p. 391-401.

PECORELLI PERES, L. A. et al. Infrastructure Plan for Charging Stations for Electric Vehicles in Rio de Janeiro. In: THE 26<sup>th</sup> INTERNATIONAL BATTERY, HYBRID AND FUEL CELL ELECTRIC VEHICLE SYMPOSIUM – EVS26. May 2012. Los Angeles.

PECORELLI PERES, L. A. et al. Test Procedures and Measurements for Recharge Evaluation of Battery Electric Vehicles in Power Concessionaires in Brazil. In: THE 24<sup>th</sup> INTERNATIONAL BATTERY, HYBRID AND FUEL CELL ELECTRIC VEHICLE SYMPOSIUM – EVS24. May 2009. Stavanger.

PEGDEN, C. D.; SHANNON, R. E.; SADOWSKI, R. P. *Introduction to Simulation Using SIMAN*. 2nd. ed. New York. McGraw-Hill. c1995. 640 p. ISBN: 0070493200.

PEREIRA, W. B. et al. Ensaios de Sistemas de Recarga de Veículos Elétricos com Vistas à Mobilidade Urbana e o Planejamento de Redes de Distribuição. In: XXI SEMINÁRIO NACIONAL DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA – SENDI. 2014. Santos.

PEREIRA, W. B.; PECORELLI PERES, L. A.; PESSANHA, J. F. M. Modelo de Simulação Estocástica da Recarga de Veículos Elétricos em Redes de Distribuição de Energia. In: XIV SIMPÓSIO DE PESQUISA OPERACIONAL E LOGÍSTICA DA MARINHA – SPOLM. Set. 2015a. Rio de Janeiro.

PEREIRA, W. B.; PECORELLI PERES, L. A.; PESSANHA, J. F. M. Modelo de Simulação de Recarga de Veículos Elétricos em Redes de Distribuição de Energia e Emissões Evitadas. In: XI CONGRESSO NACIONAL DE EXCELÊNCIA EM GESTÃO – CNEG. Ago. 2015b. Rio de Janeiro.

RAHMAN, S.; SHRESTHA, G. B. An Investigation into the Impact of Electric Vehicle Load on the Electric Utility Distribution System. *IEEE Transactions on Power Delivery*. Blacksburg. v. 8. n. 2. Apr. 1993.

RAGSDALE, C. *Spreadsheet Modeling & Decision Analysis – A practical introduction to management science*. 4th. ed. Thomson. 2004. 832 p. ISBN-13: 9780324321777.

SERRA, J. V. F. *Electric Vehicles: Technology, Policy and Commercial Development*. New York. Earthscan. c2012. 224 p.

STAATS, P. T. et al. A Procedure for Derating a Substation Transformer in the Presence of Widespread Electric Vehicle Battery Charging. *IEEE Transactions on Power Delivery*. [Austin]. v. 12. n. 4. Oct. 1997a.

STAATS, P. T. et al. A Statistical Analysis of the Effect of Electric Vehicle Battery Charging on Distribution System Harmonic Voltages. *IEEE Transactions on Power Delivery*. [Austin]. v. 13. n. 2. Apr. 1998.

STAATS, P. T. et al. A Statistical Method for Predicting the Net Harmonic Currents Generated by a Concentration of Electric Vehicle Battery Chargers. *IEEE Transactions on Power Delivery*. [Austin]. v. 12. n. 3. July 1997b.

WIKIPÉDIA. *Protocolo de Quioto*. Disponível em: <[http://pt.wikipedia.org/wiki/Protocolo\\_de\\_Quioto](http://pt.wikipedia.org/wiki/Protocolo_de_Quioto)>. Acesso em: 6 Maio 2015.



## APÊNDICE A – Estimativa de Emissões Evitadas

Segundo dados do Anuário do Setor de Distribuição de Veículos Automotores no Brasil [FENABRAVE, 2014], o Brasil ocupa a 4ª posição no ranking dos países que mais vendem veículos automotores, desde 2010, e a 18ª no ranking de crescimento, registrando uma queda nas vendas de 6,91% de 2013 para 2014.

Ainda de acordo com este anuário, o ano de 2014 marcou o fim da liderança do Volkswagen Gol como veículo mais vendido, após 27 anos, uma vez que o Fiat Palio se tornou o carro mais vendido de 2014. Porém a diferença é de apenas 1%, o que ainda deixa o Volkswagen Gol como líder de vendas dos últimos 27 anos. Isso significa que há mais veículos Gol circulando em todo o território nacional do que qualquer outro, portanto, é um ótimo exemplo para se estimar as emissões evitadas com o uso de veículos elétricos.

Dentre as versões disponíveis, o Gol 1.0 Flex é o mais econômico, o menos poluente e o mais vendido. Sendo assim, com o intuito de se obter uma estimativa robusta da quantidade de emissões evitadas com a utilização dos veículos elétricos em substituição aos veículos à combustão interna, foi feita uma análise do quanto seria emitido de gases poluentes e de efeito estufa, se os 33 carros da frota simulada fossem todos Gol 1.0 Flex. É importante mencionar que não se levou em conta os fatores de deterioração que estimam o aumento das emissões em função da quilometragem do veículo e determinam o desgaste do sistema de propulsão ao longo da vida útil do mesmo.

Com base no PBE de 2015, a Tabela A.1 apresenta as emissões de gases poluentes e de efeito estufa do Gol 1.0 Flex.

Tabela A.1 – Emissões do Gol 1.0 Flex

<b>Gases</b>	<b>Quantidade (g/km)</b>
CO <sub>2</sub> fóssil (c/ gasolina tipo C)	106
CO	0,370
NO <sub>x</sub>	0,020
NMHC	0,029

Fonte: INMETRO, 2015.

Com base nestes dados a Tabela A.12 apresenta o total das estimativas das emissões diárias, mensais e anuais de 33 carros Gol 1.0 Flex, considerando a mesma distância total percorrida de 1430,4 km, apresentada na Tabela 3.5, referente à simulação probabilística da distância percorrida e do horário de conexão, simulação mais realista.

Tabela A.2 – Estimativa das emissões do Gol 1.0 Flex

<b>Período</b>	<b>CO<sub>2</sub> fóssil (kg)</b>	<b>CO (kg)</b>	<b>NO<sub>x</sub> (kg)</b>	<b>NMHC (kg)</b>
1 dia*	151,622	0,529	0,028	0,041
1 mês (22 dias úteis)	3.335,68	11,64	0,62	0,90
1 ano (264 dias úteis)	40.028,2	139,6	7,4	10,8
Vida útil dos veículos (12,5 anos)**	500.352	1.746	92	135

\* Calculado pelo produto da distância total percorrida pela frota nas simulações (1430,4 km) pela quantidade emitida de cada poluente em g/km.

\*\* Calculado pela razão entre a distância média percorrida por um veículo à combustão interna durante sua vida útil e a distância média percorrida por este veículo por ano:  $150000/12000 = 12,5$  anos.

Fonte: O autor, 2015.

A partir dos dados da Tabela A.2 pode-se verificar que as emissões evitadas são significativas, caso se utilize um veículo elétrico à bateria ao invés do veículo à combustão interna tomado para comparação. Esta constatação é expressiva no tocante às emissões de gases de efeito estufa, (CO<sub>2</sub> fóssil equivalente), que alcança cerca de 40 toneladas por ano e mais de 500 toneladas durante um período de 12,5 anos.

## APÊNDICE B – Comparação do Consumo Energético dos VCIs e dos VEBs

Conforme informado no capítulo 1, os veículos elétricos são mais eficientes que os veículos à combustão interna, porém esta informação não é suficiente para se estimar, por exemplo, a economia de energia, em MJ, provida pelos veículos elétricos.

Para esta análise, são utilizados dados dos veículos Nissan Leaf, cujas especificações estão disponíveis via internet, e do Volkswagen Gol 1.0 Flex, o carro mais vendido dos últimos 27 anos e um dos mais econômicos, segundo [INMETRO, 2015], utilizando Gasolina Tipo C.

A Tabela B.1 apresenta os dados de consumo energético do Gol 1.0 Flex e do Leaf, respectivamente.

Tabela B.1 – Consumo energético do VW Gol 1.0 Flex e do Nissan Leaf

<b>Veículos</b>	<b>Consumo Energético</b>
VW Gol 1.0 Flex	1,75 MJ/km
Nissan Leaf 2010	0,62 MJ/km

Fonte: INMETRO, 2015.

A Tabela B.2 apresenta uma estimativa das energias gastas para abastecer os veículos de uma empresa de aluguel de carros elétricos, por exemplo, caso sua frota de 33 veículos fosse composta por VW Gol 1.0 Flex ou por Nissan Leaf e percorresse uma distância média diária de 1430,4 km, que, para efeito de comparação, é a utilizada na simulação constante neste trabalho para os carros, conforme Tabela 3.5.

Tabela B.2 – Comparação da energia gasta com reabastecimento de VCIs e VEBs

<b>Período</b>	<b>VW Gol 1.0 Flex</b>	<b>Nissan Leaf</b>
1 dia*	2.503 MJ	887 MJ
1 mês (22 dias úteis)	55.070 MJ	19.511 MJ
1 ano (264 dias úteis)	660.845 MJ	234.128 MJ
Vida útil dos veículos (12,5 anos) **	8.260.560 MJ	2.926.598 MJ

\* Calculado pelo produto do consumo energético, em MJ/km, pela distância total percorrida pela frota nas simulações (1430,4 km).

\*\* Calculado pela razão entre a distância média percorrida por um veículo à combustão interna durante sua vida útil e a distância média percorrida por este veículo por ano:  $150000/12000 = 12,5$  anos.

Fonte: O autor, 2015.

De acordo com os resultados da Tabela B.2, a energia gasta pelo Gol é, então, 2,8 vezes maior que a energia gasta pelo Leaf, para percorrer a mesma distância. Isso pode ser

traduzido para uma economia de energia de quase 65 % quando se utiliza um VEB como o Nissan Leaf em substituição a um VCI popular como o Volkswagen Gol 1.0 Flex.

De acordo com [INMETRO, 2015], o consumo energético máximo dentre os VCIs leves é de 5,35 MJ/km. Isto significa que a energia gasta por um VCI pode chegar a ser 8,6 vezes maior que a energia gasta por um VEB. Ou seja, a economia máxima de energia alcançada pela substituição de VCIs por VEBs pode chegar a 88 %.