



Universidade Federal
do Rio de Janeiro
Escola Politécnica

APLICAÇÃO DO CONCEITO *VEHICLE-TO-GRID* PARA NIVELAMENTO DE CARGA E SUPRIMENTO DE PICO DE DEMANDA

Helena Bento Martins do Valle

Projeto de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheira.

Orientador: Luís Guilherme Barbosa Rolim

Rio de Janeiro
Agosto de 2015

APLICAÇÃO DO CONCEITO *VEHICLE-TO-GRID* PARA NIVELAMENTO DE CARGA E
SUPRIMENTO DE PICO DE DEMANDA

Helena Bento Martins do Valle

PROJETO DE GRADUAÇÃO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRA ELETRICISTA.

Examinada por:

Prof. Luís Guilherme Barbosa Rolim, Dr.-Ing.
(Orientador)

Prof. Robson Francisco da Silva Dias, D.Sc.

Prof. Sergio Sami Hazan, PhD.

Eng. Silvangelia Lilian da Silva Lima Barcelos, D. Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL
AGOSTO DE 2015

Valle, Helena Bento Martins do

Aplicação do conceito *Vehicle-to-Grid* para nivelamento de carga e suprimento de pico de demanda / Helena Bento Martins do Valle, - Rio de Janeiro: UFRJ/ ESCOLA POLITÉCNICA, 2015.

XI, 73 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Luís Guilherme Barbosa Rolim.

Projeto de Graduação – UFRJ/ POLI/ Engenharia Elétrica, 2015.

Referências Bibliográficas: p. 52-55.

1. *Vehicle-to-Grid*. 2. Veículos Elétricos. 3. Serviços Ancilares. I. Luís Guilherme Barbosa Rolim. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ, Engenharia Elétrica. III. Aplicação do conceito de *Vehicle-to-Grid* para nivelamento de carga e suprimento de pico de demanda.

„Nach dem Spiel ist vor dem Spiel“

- Sepp Herberger

A todos aqueles que jogaram comigo e já estão se preparando para os próximos jogos. Principalmente à Otilina Bento, Ivan Valle, Amanda do Valle e Joice Francesconi, que estão ao meu lado há mais partidas que consigo me lembrar.

AGRADECIMENTOS

A vida é uma maratona que não se faz sozinho. Sem meus pais nada disso teria sido possível. Muito obrigada Maria Otilina dos Santos Bento e Ivan Martins do Valle, por sempre me aconselharem e apoiarem, mas deixarem que eu tomasse as decisões por mim. Não há nada que possa ser feito para retribuir o amor incondicional de vocês, a confiança que sempre depositaram em mim e tudo que me ensinaram. Toda vitória que eu tiver nessa vida é de vocês. A vocês, minha mais sincera gratidão.

A minha irmãzinha, Amanda do Valle, que sempre esteve do meu lado sendo minha melhor companhia. Obrigada por ser tão compreensiva pelos dias que não pude estar para você a fim de começar e fechar essa jornada.

A minha namorada, Yasmyn Guimarães, por todo apoio emocional, pelo ombro, pela ajuda que ofereceu, mesmo sendo de área distinta. Por ter encarado todos os dramas e tédios de estar do meu lado nos meses que antecederam a entrega deste projeto. Por ter me mantido mentalmente estável (mais ou menos), muito obrigada!

A minha irmã gêmea, Camila Fernandes, que tanto me impulsionou pela trajetória da faculdade e tantas vezes repetiu que eu escrevia bem... Pois bem, não há palavras no dicionário para te agradecer ter aceitado cruzar essa linha comigo. Foi tudo muito fixe! Prepara-te para as próximas!

A minha *Schemkes Familie*: Alexandre Martuscelli, Ana “Dark”, Ana Cláudia “Cacá”, Bruna Seewald, Bruno Agüero, Luiza Grossi e Natacha Lamounier, vocês fizeram mais do que me falar que era possível, vocês me mostraram o caminho, me incentivaram o tempo todo. A cada encontro que tivemos nesses últimos dois anos, era um sopro de esperança para mim. Muito obrigada!

Aos meus grandes amigos, Bruno Saraiva, Hugo Ferreira, Jairo Borges, Joice Francesconi e Victor Dias, acabou a era de desculpas para faltar os aniversários. Obrigada por compreenderem e me aceitarem de volta a cada furo que eu dei. Recompensarei tudo.

Aos meus colegas de faculdade, que nunca foram exemplos acadêmicos, mas que foram minhas companhias de estudo, me ajudaram nos trabalhos e me lembraram que a vida é muito mais que engenharia. Estamos conseguindo!

A todos os professores do DEE, por serem fonte ininterrupta de inspiração. Principalmente aos professores Lopes, Marcos, Robson, Rubens, Sérgio, Zé Luiz e Walter, por terem impactado minha vida profissional e pessoalmente.

Este projeto é resultado de ajudas mútuas, muitos foram aqueles que me aconselharam, conversaram, debateram o tema, compartilharam informações e equipamentos e arrumaram a infraestrutura para que fosse possível. Um agradecimento especial ao Seu

Laerte, do Departamento de Transportes, Eng. Silvangela, do ELEPOT, João Victor, do Fundo Verde e Eng. Douglas Cortes, do Escritório de Planejamento da Decania do CT.

Por fim, e muito importante, ao meu orientador acadêmico, de vida, universo e tudo mais, Guilherme Rolim. Muito obrigada por ter apostado em mim, por ter me ensinado tanto, pela paciência de explicar várias vezes a mesma coisa, às vezes de assuntos que nem eram das suas disciplinas e, principalmente, por ter respondido rapidamente meus e-mails desesperados, eu sou muito grata. Que a vida seja longa e próspera e que nossos caminhos profissionais não deixem de se cruzar. Sei que você sempre terá algo a me ensinar e um jeito de me guiar a fazer o correto. *Vielen lieben Dank!*

Resumo do Projeto de Graduação apresentado à Escola Politécnica/ UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenharia Eletricista.

APLICAÇÃO DO CONCEITO *VEHICLE-TO-GRID* PARA NIVELAMENTO DE CARGA E SUPRIMENTO DE PICO DE DEMANDA

Helena Bento Martins do Valle

Agosto/2015

Orientador: Luís Guilherme Barbosa Rolim

Curso: Engenharia Elétrica

As preocupações ambientais devido à emissão de CO₂ estão impulsionando um novo mercado para a indústria automobilística: os veículos elétricos (VEs). Os maiores mercados se concentram nos Estados Unidos e Japão, mas o Brasil aparece entre os 25 países com maior desenvolvimento e incentivos na área. Com o aumento da penetração de VEs, diversos estudos foram levantados para avaliar o impacto da conexão dos veículos na rede elétrica. Um dos conceitos emergentes é a utilização da energia armazenada nos veículos para oferecer suporte à rede. Conhecido por *Vehicle-to-Grid* (V2G), é o tema principal de estudo deste projeto base. Aplicado à curva de carga padrão do Centro de Tecnologia da UFRJ, procurou-se avaliar quais são as vantagens para a instalação a adoção de um sistema V2G.

Palavras-chave: Veículos Elétricos, *Vehicle-to-Grid*, Serviços Ancilares.

Abstract of Undergraduate Project presented to POLI/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Electrical Engineer.

VEHICLE-TO-GRID CONCEPT APPLIED TO LOAD LEVELING AND PEAK SHAVING

Helena Bento Martins do Valle

Agosto/2015

Advisor: Luís Guilherme Barbosa Rolim

Course: Electrical Engineering

The environmental issues regarding greenhouse gases have set a new market for automakers, the electric vehicles (EV). Most of the sales take place in United States and Japan, nevertheless Brazil appears within the top 25 countries with greater incentives and development in this field. The EVs penetration increase, several studies have been done to evaluate the impact of the connection to the power system. One of the emerging concepts is to use the stored energy to provide network support. Commonly referred as Vehicle-to-Grid (V2G), it is the main study object to this concept project. Applied to a standard load curve of UFRJ Technology Centre, it was evaluated the site's benefits regarding the use of V2G system.

Key words: Electric Vehicles, Vehicle-to-Grid, Ancillary Services.

SUMÁRIO

1	Introdução	1
1.1	Metodologia	2
1.2	Organização do trabalho	2
2	Conceituação	3
2.1	Veículos Elétricos	5
2.1.1	Veículos elétricos híbridos (HEV).....	5
2.1.2	Veículos elétricos híbridos de recarga externa (PHEV).....	7
2.1.3	Veículos elétricos a bateria (BEV).....	8
2.2	Tipos de recarga e carregadores	10
2.3	Interação com a rede elétrica.....	13
2.4	Vehicle-to-Grid.....	15
2.5	Serviços Ancilares	20
2.5.1	Identificação dos Serviços Ancilares.....	23
2.5.2	Prestação de Serviços Ancilares através de VEs	27
3	Formulação da proposta	29
3.1	Análise da Instalação	29
3.2	Veículo Selecionado para estudo.....	35
3.2.1	Teste de uso (descarga).....	36
3.2.2	Teste de recarga	38
3.3	Premissas.....	40
4	Análise de cenários.....	42
4.1	Cenário 1	43
4.2	Cenário 2	45
4.3	Cenário 3.....	48

4.4	Sugestões para implantação.....	51
5	Considerações finais.....	52
5.1	Sugestões de trabalhos futuros.....	52
6	Referências	54
	Apêndice A	58
	Apêndice B	66

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ABVE – Associação Brasileira de Veículos Elétricos

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

BEV – Battery Electric Vehicle

CA – Corrente Alternada

CAG – Controle Automático de Geração

CC – Corrente Contínua

CCEE – Câmara de Comercialização de Energia Elétrica

CD – Charge-Depleting mode

COPPE – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia

CS – Charge-Sustaining mode

CT – Centro de Tecnologia

ECE – Esquemas de Controle de Emergência

ECS – Esquemas de Controle de Segurança

EPE – Empresa de Pesquisa Energética

ESS – Energy Storage System

EUA – Estados Unidos da América

EV – Electric Vehicle

EVSE – Electric Vehicle Supply Equipment

FEGELC – Ferramenta de Gerenciamento de Energia Elétrica Controlada

G2V – Grid-to-Vehicle

HEV – Hybrid Electric Vehicle

IEC – International Electrotechnical Commission

IHP – Interruptor Horário Programável

IMA – Instituto de Macromoléculas

ISO – Independent System Operator

MCI – Motor de Combustão Interna

MME – Ministério de Minas e Energias

NEDC – New European Driving Cycle

NIDES – Núcleo Interdisciplinar de Desenvolvimento Social

ONS – Operador Nacional do Sistema

PCS – Power Control System

PHEV – Plug-in Hybrid Electric Vehicle

PRODIST – Procedimentos de Distribuição

PROREDE – Procedimentos de Rede

PWM – Pulse Width Modulation

RMS – Root Mean Square

RPG – Responsabilidade Própria de Geração

SA – Serviços Ancilares

SAE – Society of Automotive Engineers

SEP – Sistema Especial de Proteção

SIN – Sistema Interligado Nacional

SOC – State of Charge

THD – Total Harmonic Distortion

UFRJ – Universidade Federal do Rio de Janeiro

USEPA – US Environmental Protection Agency

V2G – Vehicle-to-Grid

V2H – Vehicle-to-Home

VE – Veículo Elétrico

LISTA DE SÍMBOLOS

a – Autonomia do veículo

d – Dias

E – Energia

E_{bat} – Energia disponível na bateria

$E_{\text{disponível}}$ – energia que pode ser dada pelo veículo

N – quantidade de veículos conectados a rede e desempenhando o V2G ou sendo recarregados

N_{frota} – Montante de automóveis

P – Potência

P_{CB} – Potência do Caso Base

P_{ch} – Potência de recarga

P_{G2V} – Potência transferida no G2V (recarga)

P_{lim} – Potência demandada máxima para começar a operação do V2G

P_{V2G} – Potência transferida no V2G

t_{despacho} – tempo de despacho na operação do V2G

t_{G2V} – tempo de operação do G2V

t_{V2G} – tempo de operação do V2G

ε – Eficiência do veículo

γ – Índice de penetração

η – Eficiência do sistema que desempenha o V2G

1 INTRODUÇÃO

O fornecimento de energia elétrica é visto como um bem comum e um serviço essencial, devendo atender a toda a população e o desenvolvimento da sociedade hoje está estreitamente correlacionado com o uso da energia. O constante crescimento demográfico aliado ao desenvolvimento dos países pode ter como consequência, por exemplo, a escassez de recursos naturais e o aumento da poluição produzida.

As preocupações em relação ao meio-ambiente estão levando diversas entidades a procurarem soluções para reduzir o impacto ambiental. No campo de engenharia de energia nota-se o aumento de investimento na diversificação da matriz energética, focado em fontes renováveis, além das pesquisas voltadas aos veículos elétricos (VEs), que surgem como uma premissa para mitigar a poluição local. Ademais, a eletrificação da frota é uma saída para diminuir a forte dependência dos automóveis por combustíveis fósseis.

Um estudo do Ministério de Minas e Energias (MME) de 2014 [1] apontou que o setor de transportes foi responsável por mais de 40% das emissões de CO₂ no Brasil, consumindo 32,5% das toneladas equivalente de petróleo (tEP). Essa dependência é ainda maior em outros países que não possuem combustíveis alternativos, como o etanol.

Os veículos elétricos (VEs) passaram a ganhar espaço nas conjunturas social e política, impulsionando as pesquisas para a criação de um novo mercado. Dentre as opções, os veículos a bateria estão se popularizando mais rapidamente, grande parte graças ao avanço nas tecnologias de íon-lítio, bateria mais utilizada devido aos benefícios na relação peso e energia armazenada.

Existem três modelos comercializados de veículos a bateria: o híbrido (HEV, da sigla em inglês *hybrid electric vehicle*), híbridos de recarga externa (PHEV, *plug-in hybrid electric vehicle*) e os puramente a bateria (BEV, *battery electric vehicle*) [2]. Os dois últimos são de especial interesse para o sistema elétrico, pois oferecem conectividade com a rede para recarga da bateria.

Muitos estudos já estão sendo feitos visando compreender o impacto que os VEs podem causar nas redes de distribuição e as mudanças que podem ocorrer no perfil de carga. Um deles visa a coordenação das recargas, onde o veículo passa a recarregar em um horário de baixa demanda.

A conectividade com a rede pode ser programada de forma a não somente nivelar a curva de carga, mas também para prestação de serviços à rede elétrica. Esse último caso é conhecido por *Vehicle-to-Grid* (V2G) [3], foco principal deste projeto.

Derivando-se do V2G surgiu a nomenclatura G2V, do inglês *Grid-to-Vehicle*, que é quando o fluxo de potência é realizado da rede para o veículo, representando a recarga. Como a conexão com a rede envolve diversas partes, as montadoras começaram a desenvolver um

projeto em que o veículo interage somente com o local em que está conectado, podendo suprir necessidades energéticas através das suas baterias. Esse conceito é chamado de *Vehicle-to-Home* (V2H).

Essas tecnologias poderão ser implementadas com melhor desempenho depois da difusão da rede inteligente (Smart Grid) [2], quando a integração dos sistemas de comunicação com o sistema elétrico de potência permitirá um melhor desempenho da rede. Em específico aos VEs, a rede inteligente permite coordenar a direção do fluxo de potência, indicando as horas que o veículo pode carregar ou fornecer um serviço.

O objetivo deste trabalho é analisar diferentes cenários para aplicação do conceito de *Vehicle-to-Grid*, a partir de uma hipótese do uso de veículos puramente elétricos no Centro de Tecnologia da UFRJ. Será avaliado o impacto da recarga na demanda de potência e mostrado propostas de soluções para mitigar esse problema através do V2G, na redução da demanda medida e do consumo de energia.

1.1 METODOLOGIA

O desenvolvimento deste projeto começou através de uma revisão bibliográfica guiada cronologicamente, a fim de ter uma visão global do desenvolvimento dos veículos elétricos e a evolução dos estudos no campo de *Vehicle-to-Grid*.

Para o entendimento do comportamento da curva de carga da instalação, foram utilizados os registros de demanda da memória de massa do medidor de energia do Centro de Tecnologia, obtidos juntamente à concessionária, Light Serviços de Eletricidade S.A..

O estudo do impacto é realizado utilizando-se como ferramenta de cálculo uma planilha eletrônica.

1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

No capítulo 2 é realizado todo o levantamento teórico dos conceitos necessários para embasar o projeto. No capítulo 3 são apresentadas todas as informações das partes do projeto (instalação e veículo elétrico) e as premissas adotadas. Em seguida, faz-se no capítulo 4 a análise de três cenários, simulando o impacto do *Vehicle-to-Grid* em diferentes situações. Por fim, as conclusões e sugestões de trabalhos futuros são apresentadas no capítulo 5.

2 CONCEITUAÇÃO

Quando se fala de carros elétricos ainda soa como algo futurístico e bem longe da realidade, mas veículos com esse tipo de propulsão foram produzidos antes mesmo da existência dos motores a combustão interna. O avanço na tecnologia certamente deixou os carros elétricos melhores, mas os componentes básicos são os mesmos desde metade do século XIX.

Carros elétricos foram fabricados em escala até o início do século XX, sendo a escolha mais natural para aqueles que dirigiam em perímetro urbano devido ao conforto, facilidade de direção, seu motor silencioso, disponibilidade de energia para recarga, entre outros fatores. A extinção da sua produção foi impulsionada mais pela disponibilidade e baixos preços da gasolina do que pelas vantagens técnicas apresentadas pelo motor de combustão interna (MCI) [4]. No entanto, os veículos elétricos pesados (e.g., metrô, trens e *trolleys*) continuaram a serem produzidos e são até hoje largamente utilizados para transporte de massa em todo o mundo devido a sua confiabilidade e eficiência.

As questões ambientais levantadas na década de 60 somadas às crises petrolíferas dos anos 70 incentivaram a volta do interesse por carros elétricos. Nessa época, já era comum nos Estados Unidos a conversão de carros. As montadoras, contudo, ainda não consideravam a mudança do paradigma para veículos leves.

Ao longo dos últimos anos alguns mitos do mercado automotivo têm sido quebrados, aumentando o interesse público nos VEs. As grandes empresas do ramo automobilístico vêm respondendo a esse estímulo, estabelecendo um ambiente de desenvolvimento de tecnologias, ampliando a viabilidade da produção em larga escala de carros elétricos. Em [4] apontam-se cinco áreas que são bases para promover o ressurgimento do veículo elétrico, são elas: interesse na ampliação da velocidade, interesse na ampliação da autonomia, criação de associações para veículos elétricos (como a ABVE¹), aprimoramento da legislação e incentivos, e expansão de outras tecnologias para propulsão.

Entretanto, a inserção em massa no mercado não virá isenta de desafios. Há a necessidade de investimento na infraestrutura de postos de recarga e do sistema elétrico como um todo. As cargas rápidas exigem correntes elevadas e nos casos em que a carga não é controlada, i.e., o carregamento se inicia na conexão do carro à rede, a demanda poderá aumentar em horários de pico de tal forma que resultará em cortes de carga [5]. Um estudo publicado estima que a carga de VEs em 2030 seja responsável por 5% do consumo total de energia na Bélgica [6], levando a supor que outros países possam ter índices semelhantes.

¹ A ABVE, Associação Brasileira de Veículos Elétricos, foi formada em 2006, sendo uma associação civil de direito privado sem fins lucrativos que visa incentivar o desenvolvimento e utilização de Veículos Elétricos.

Em 2014 a Jato Dynamics realizou um levantamento com os 25 países que possuem alguma representatividade no segmento de veículos elétricos. A pesquisa focou somente nos híbridos, que representam apenas 4,47% da frota total desses países. No Brasil, um dos países pesquisados, apenas 0,02% da frota é de veículos híbridos, tendo sido vendidos 82 modelos durante os 11 meses de pesquisa. O Japão é o que possui maior representatividade, o volume interno de veículos híbridos chega a 19,44% [7]. A crescente adesão nipônica aos veículos elétricos ficou visível quando, no início de 2015, foi anunciado que existiam mais pontos de recarga para veículos elétricos que postos de gasolina (40 mil contra 34 mil) [8]. Além disso, Toyota, Honda e Nissan, todas três japonesas, apresentam a maior participação nesse segmento de mercado, sendo o Nissan LEAF o veículo puramente elétrico mais vendido no mundo.

No Brasil, o veículo elétrico chega a um preço muito superior ao dos convencionais, impossibilitando a compra pela maior parte da população. Na sua maioria, os VEs fazem parte de uma frota empresarial ou foram doados para testes, como é o caso dos táxis elétricos nas cidades do Rio de Janeiro e São Paulo [9].

Para incentivar a pesquisa e desenvolvimento de veículos com baixa ou zero emissão de CO₂, foi lançado o Programa de Incentivo à Inovação Tecnológica e Adensamento da Cadeia Produtiva de Veículos Automotores (Inovar-Auto) em 2012. O programa vai até 2017 e garante incentivos fiscais para as montadoras que conseguirem reduzir o consumo de combustível da sua frota total em 12%. Aquelas que fabricam veículos puramente elétricos ou híbridos saem em vantagem, podendo atingir esse patamar mais rapidamente.

Embora os números ainda sejam muito baixos, pesquisas apontam para o crescimento da venda de VEs. É esperada para 2015 a inserção de 500 mil veículos elétricos no mundo, tendo como previsão cerca de 10 milhões de veículos elétricos no mundo em 2020 [10]. Em muito breve os veículos elétricos serão realidade nas ruas, portanto suportar vários carros conectados à rede é um desafio global e iminente para todas as empresas de energia.

2.1 VEÍCULOS ELÉTRICOS

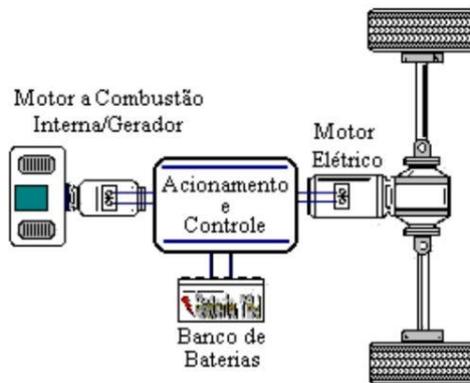
Veículos elétricos são aqueles cuja propulsão se dá por meio de motor elétrico, podendo ser categorizados em três tipos: híbridos, híbridos de recarga externa (conhecidos por híbridos *plug-in*) e a bateria. Os dois últimos são de especial interesse para o sistema elétrico devido a sua conexão com a rede.

2.1.1 VEÍCULOS ELÉTRICOS HÍBRIDOS (HEV)

Veículos híbridos possuem mais de um motor, normalmente combinando o tradicional motor a combustão interna (MCI) com um elétrico. Portanto a energia disponível está presente de duas formas: no tanque de combustível e na bateria. As baterias desses veículos costumam ser pequenas, sendo usadas somente para armazenar a energia gerada pelo MCI ou pelo sistema de frenagem.

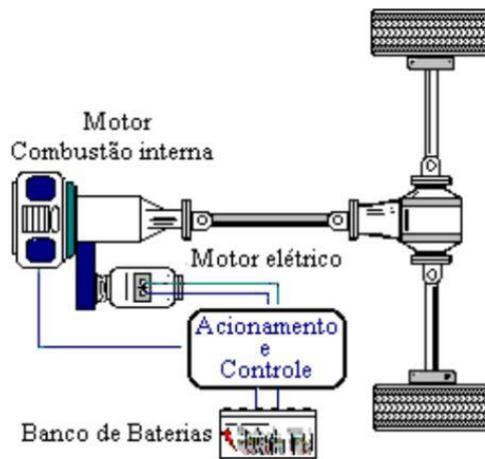
Motores a combustão de veículos leves são regidos em maioria pelo ciclo de Otto, que apresenta baixa eficiência de conversão de energia em regime de baixas rotações. Em cidades onde o tráfego é intenso e/ou se permanece muito tempo parado, o motor passa a operar constantemente nesse regime. Um veículo híbrido permite que o MCI trabalhe de forma otimizada, podendo ser desligado em situações de baixa rotação, como quando o carro se encontra parado. Os motores desses veículos podem ser menores em tamanho e potência, reduzindo o consumo de combustível em até 40% no uso urbano [11].

Os HEVs são comercializados com três arquiteturas diferentes para a transmissão de energia para a roda: série, paralelo e série-paralelo ou misto (Figura 2-1, Figura 2-2 e Figura 2-3, respectivamente). A diferença principal entre elas está na forma de propulsão do veículo. Na primeira configuração, somente o motor elétrico é responsável por acionar as rodas, enquanto o MCI tem por função acionar um gerador para recarregar a bateria. Na configuração paralelo, os dois motores podem movimentar o veículo, separada ou conjuntamente, conforme a necessidade do percurso. Como não há um gerador interno, o motor elétrico passa a assumir essa função, sendo usado durante a frenagem regenerativa para recarregar a bateria. Por último, o sistema híbrido misto visa maximizar a eficiência de ambas as arquiteturas, onde o MCI e o motor elétrico podem simultaneamente gerar energia para propulsão ou recarga da bateria.



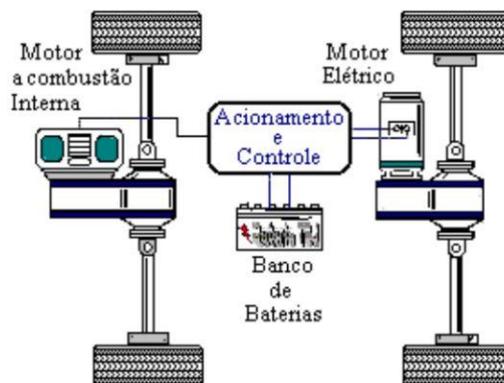
Fonte [2]

Figura 2-1: HEV série



Fonte [2]

Figura 2-2 : HEV paralelo



Fonte [2]

Figura 2-3 : HEV série-paralelo

2.1.2 VEÍCULOS ELÉTRICOS HÍBRIDOS DE RECARGA EXTERNA (PHEV)

Assim como os HEVs, os PHEVs são constituídos do motor a combustão combinado com o motor elétrico. O PHEV pode ser visto como uma segunda geração dos HEVs, sendo seu principal *upgrade* a adição de um carregador, permitindo que a bateria seja carregada diretamente a partir da conexão com a rede elétrica.

A principal vantagem desse modelo em relação aos puramente elétricos é a autonomia total do veículo. A bateria aqui usada deve ser pelo menos cinco vezes maior que as do HEV [12], permitindo maior alcance com operação sem emissões, porém menor que as dos puramente elétricos, garantindo um preço mais atrativo no mercado.

Existem diferentes modos de gerenciamento energético nos veículos plug-in, definindo qual fonte de energia será utilizada para melhor eficiência e redução do impacto ambiental. Essa seleção é fator principal na determinação do consumo energético do PHEV. Os modos mais relevantes são [13]:

- i. Modo de Sustentação de Carga (*Charge-Sustaining mode* – CS): este é o modo mais comum de operação dos veículos híbridos, nele o estado de carga da bateria (SOC, do inglês *State of Charge*) é mantido em uma faixa de funcionamento. Para a carga da bateria permanecer praticamente constante no tempo, o MCI deve funcionar constantemente, sendo a combustão a principal fonte de energia para o veículo.
- ii. Modo Depleção de Carga (*Charge-Depleting mode* – CD): neste modo a principal fonte de energia para o veículo é a bateria, portanto o SOC decai durante a operação.
- iii. Modo Veículo Elétrico: neste modo o PHEV se assemelha ao BEV, não havendo intervenção alguma do motor a combustão.
- iv. Modo Motor de Combustão Interna: neste modo o PHEV funciona como um veículo convencional, o sistema de tração elétrica não é utilizado.

O PHEV é projetado para operar com confiabilidade independente do modo de gerenciamento de energia selecionado. Essa seleção pode ser automática ou manual. No caso automático levam-se em conta alguns parâmetros como: estado de carga da bateria, velocidade, torque, rotação do motor, temperatura ambiente e temperatura da bateria. A operação dos veículos em uma sequência fixa dos modos de gerenciamento gerou uma classificação para os PHEVs [13]:

- i. PHEV Extensor de Autonomia (*Range extender PHEV*): O Modo Veículo Elétrico é usado majoritariamente mudando para o Modo Sustentação de Carga quando o SOC fica reduzido.

ii. PHEV Misturado² (*PHEV Blended*): O Modo Depleção de Carga é selecionado até que o SOC atinja um determinado nível, alterando para o Modo Sustentação de Carga.

iii. PHEV Zona Verde (*Green Zone PHEV*): Opera quase que exclusivamente no Modo de Sustentação de Carga, porém o usuário tem o controle, podendo variar para o Modo Veículo Elétrico.

O motorista, na escolha dos modos de gerenciamento, costuma levar em conta a economia, os impactos ambientais ou o desempenho do veículo, o que inclui a autonomia. Deve-se atentar também a distância média do percurso para garantir atendimento do modo selecionado.

A flexibilidade de carga e a economia que o PHEV pode propiciar devido a maior capacidade da sua bateria é fator determinante na satisfação dos usuários, como foi apontado em duas pesquisas realizadas nos EUA. A maioria das pessoas prefere abastecer em casa ou em estacionamentos que utilizam frequentemente, a utilizar combustíveis líquidos [2].

2.1.3 VEÍCULOS ELÉTRICOS A BATERIA (BEV)

Nos veículos puramente elétricos a única fonte de energia é a bateria, sendo a propulsão realizada por um motor elétrico. A recarga é principalmente realizada por conexão com a rede, havendo a possibilidade também de frenagem regenerativa.

A frenagem regenerativa se dá quando o motor passa a funcionar como gerador nos momentos de desaceleração ou parada. Para auxiliar esse processo pode-se fazer uso de ultra-capacitores³, capazes de absorver a energia gerada mais rapidamente que a bateria, podendo trabalhar também no fluxo inverso, garantindo rápida aceleração do veículo [2].

O BEV apresenta funcionamento muito mais simples que os automóveis convencionais, dispensando embreagem e caixa de marchas, trazendo conforto aos motoristas de grandes centros, onde a troca de marcha é atividade frequente. Para melhorar a experiência de condução, destaca-se ainda o motor silencioso e baixa vibração do veículo.

A principal desvantagem está nas baterias: é o elemento mais caro e pesado do veículo. A densidade de energia é baixa quando comparada aos combustíveis líquidos, para uma autonomia de 500 km seria necessária uma bateria com capacidade mínima de 75 kWh [12], cerca de três vezes maior que a bateria do Nissan LEAF. Como consequência de não

² Esta tradução é livre e foi adotada conforme sugestão em [2].

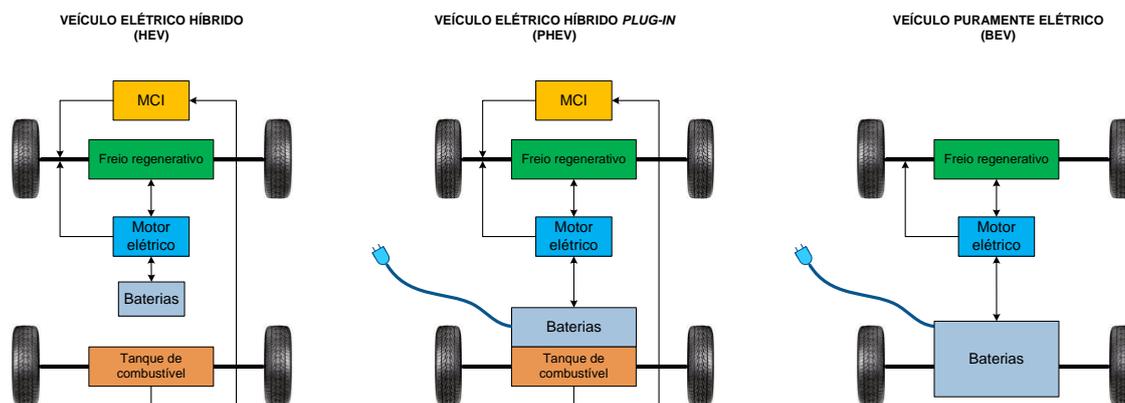
³ Também denominados supercapacitores.

poder aumentar a bateria indefinidamente, os BEVs são vistos como carros estritamente urbanos.

A baixa autonomia é uma desvantagem limitadora à inserção dos BEVs no mercado. O medo de que a bateria acabe antes de chegar ao destino final é tão comum que é popularmente conhecido pela expressão *range anxiety* [14], cuja tradução livre é comumente encontrada na literatura como “ansiedade do motorista”. A solução mais simples apresentada para aumentar a aceitação do veículo puramente elétrico é a implementação de estações de carga rápida. Já foi levantada a hipótese de um sistema de troca de baterias, o contraponto é a ampla padronização que as montadoras deveriam seguir.

Ainda assim, o BEV apresenta uma ótima oportunidade para redução de poluição ambiental local, principalmente quando combinados com uma matriz energética renovável.

A Figura 2-4 ilustra a diferença entre arquitetura de cada um dos tipos de VE e a Tabela 2-1 faz uma comparação entre PHEVs, operando em Modo Veículo Elétrico, e BEVs.



Elaboração própria

Figura 2-4: Ilustração dos diferentes sistemas de propulsão dos VEs

Tabela 2-1: Comparação entre VEs

Elaboração própria baseada nas informações disponíveis nas páginas da Wikipédia de cada veículo

MODELO	TIPO	ENERGIA (kWh)	AUTONOMIA PREVISTA (km)	ÓRGÃO DOCUMENTADOR
Chevrolet Volt 2011	PHEV	16	56	USEPA
Toyota Prius 2012	PHEV	5,2	23	-
BYD F3DM	PHEV	16	64	-
BMW i8	PHEV	7,1	24	USEPA
BMW i3	BEV	18,8	130	USEPA
Nissan LEAF 2011	BEV	24	117	USEPA
Mitsubishi i-MiEV	BEV	16	100	USEPA
Renault Zoe	BEV	22	210	NEDC

2.2 TIPOS DE RECARGA E CARREGADORES

Baterias, de uma forma geral, podem ser carregadas através de dois métodos: recarga condutiva ou indutiva. A carga indutiva, também conhecida como carga *wireless*, necessita de uma estação de carga, onde uma bobina é usada para criar um fluxo magnético alternado que induz corrente em uma segunda bobina embarcada no dispositivo a ser carregado, similar ao que ocorre em transformadores de potência. Embora seja uma opção mais segura, por não conter partes condutoras expostas, e com alta durabilidade, a baixa eficiência e o tempo demandado nesse tipo de recarga eliminam seu uso em grande escala para VEs.

A carga condutiva faz uso de um contato físico, podendo ser realizada em tomadas padrões ou estações de recarga, apresentando praticidade. Essa conveniência ajuda na maior aceitação desse método de recarga.

Em geral, os PHEVs possuem baterias menores, portanto a energia transferida durante a recarga é também menor, o que torna viável a recarga em tomadas residenciais em um tempo satisfatório para alcançar a autonomia desejada pelos usuários. Já no caso dos BEVs, onde a bateria é a única fonte de energia do veículo, é importante o investimento em pontos públicos de recarga. Em [15] foi sugerido que, antes da implementação de pontos de recarga em grande escala, fossem determinados padrões de conectores e protocolos de comunicação entre os veículos e a infraestrutura.

Nos Estados Unidos da América e no Japão a norma adotada é a SAE J1772, produzida em 2009 e mantida pela SAE (*Society of Automotive Engineers*). A intenção da norma é definir um sistema de carga condutiva para VEs, o que inclui a parte mecânica e elétrica do carregador, os requisitos de performance e protocolo de comunicação. Foi adotada na terceira geração do Chevrolet Volt e nos modelos recentes do Nissan LEAF, por exemplo. Ainda no Japão, foi elaborado um método de carga rápida conhecido por CHAdeMO⁴, amplamente aceito pelos fabricantes japoneses, além de ser encontrado no Citroën C-ZERO, Peugeot iOn ou no Tesla Model S, disponível através de adaptador externo opcional.

O conector J1772-2009 (Figura 2-5 e Figura 2-6) foi projetado para atender instalações monofásicas de 120V ou 240V, como as presentes na América do Norte e no Japão, são equipados com sensor de proximidade e *Control Pilot*, um sistema que faz a comunicação

⁴ CHAdeMO é uma abreviação para “Charge de Move”, expressão equivalente em inglês para “move by charge”, em tradução livre, “movido a cargas”. A Associação japonesa objetiva aumentar a quantidade de instalações para recargas rápidas no mundo. Em seu método a recarga é realizada em corrente contínua com uma tensão elevada, podendo entregar uma potência de até 62,5kW. Existem diversos tipos de conectores compatíveis com esse sistema de recarga, além de estações de recargas regulamentadas pela Associação. Sua popularidade está cada vez mais crescente, tendo mais de 8500 estações construídas pelo mundo. [23]

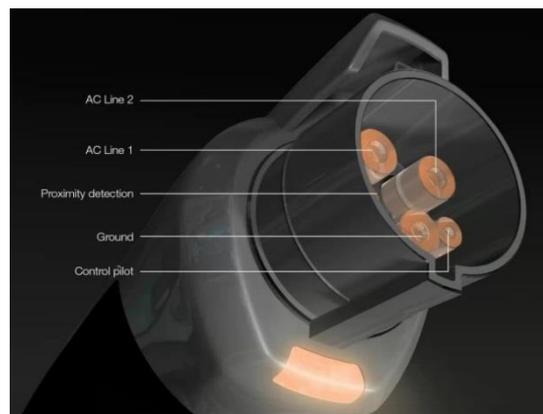
entre o estado de carga da bateria e o carregador, dentre outras informações. Essa comunicação é realizada através de uma onda quadrada bipolar com amplitude igual a 12V e frequência de 1kHz, gerada pelo carregador (ou EVSE, do inglês *Electric Vehicle Supply Equipment*).

Para os modos de carga, são definidos cinco níveis, dois em corrente alternada e três em corrente contínua. O resumo deles é apresentado na Tabela 2-2. Embora ainda não haja equipamentos que cheguem ao nível 3 para cargas em corrente contínua, ele já foi catalogado pela norma.



Fonte: "SAE J1772 7058855567" by Michael Hicks / Flickr "mulad".

Figura 2-5: Conector SAE J1772.



Fonte: [16]

Figura 2-6: Especificação do conector SAE J1772.

Tabela 2-2: Resumo dos tipos de carga previstos na norma SAE J1772

Elaboração própria baseada em [16]

	TENSÃO (V)	CORRENTE (A)	POTÊNCIA (kW)
CA Nível 1	120	16	1,92
CA Nível 2	240	80	19,2
CC Nível 1	200 - 450	80	36
CC Nível 2	200 - 450	200	90
CC Nível 3	200 - 600	400	240

Na Europa a norma adotada é a IEC 62196, tendo sua primeira edição em 2003 e sendo mantida pela *International Electrotechnical Commission* (IEC). É aplicável para todos os plugues, tomadas, conectores e configurações de cabos de veículos elétricos, utilizados para recarga condutiva, que não ultrapasse 690V/250A em corrente alternada ou 600V/400A em corrente contínua, incluindo os sistemas de controle.

Para conectores, a IEC 62196 se baseia na IEC 60309 para tomadas e plugues industriais e multifásicos, listando ao final três tipos de conectores, dentre eles o SAE J1772-2009, referido como Tipo 1. O Tipo 2 é o VDE-AR-E 2623-2-2, conhecido também pelo nome do fabricante: Mennekes. Embora o design externo seja diferente, manteve-se o mesmo

protocolo de comunicação estabelecido na SAE J1772. O Tipo 3 (EV Plug Alliance Connector) foi elaborado em 2010 através de uma aliança entre empresas francesas e italianas e tem sido utilizado em testes da Formula-E.

No que tange os modos de carga, baseia-se na norma IEC 61851. Os modos de recarga foram divididos em quatro tipos e seu resumo é apresentado na Tabela 2-3. O Modo 4 está sendo desenvolvido para uma terceira norma, IEC 62196-3. É esperado que nesse modo a bateria possa ser carregada em até 10 minutos. Além disso, foi determinado o método de comunicação entre controlador de carga e a rede, devendo ser realizado através da modulação por largura de pulso (PWM, do inglês *pulse width modulation*).

Recentemente no Brasil a ABNT adotou a IEC 61851, traduzindo-a e formando a ABNT NBR IEC 61851:2013.



Fonte: "VDE-AR-E 2623-2-2-plug" by loremo / Flickr
"loremo"

Figura 2-7: Carregador Tipo 2, Mannekes.



Figura 2-8: Carregador Tipo 3

Tabela 2-3: Resumo dos tipos de carga previstos na norma IEC 62196.

Elaboração própria baseada em [17]

	DESCRIÇÃO	TENSÃO (V)	CORRENTE (A)
Modo 1	Carga lenta através de uma tomada residencial	250 (1 ϕ) 480 (3 ϕ)	16 CA
Modo 2	Carga lenta através de uma tomada residencial com dispositivo interno de proteção	250 (1 ϕ) 480 (3 ϕ)	32 CA
Modo 3	Carga lenta ou rápida através de um ponto específico para VE com sistemas de controle e proteção		32 / 250 CA
Modo 4	Carga rápida usando um carregador externo		400 CC

2.3 INTERAÇÃO COM A REDE ELÉTRICA

Os veículos tipo PHEV e BEV possuem como adicional uma conexão à rede para recarga, portanto o estudo dos impactos será essencial para o planejamento energético futuro.

Nos estudos de impacto na rede o modo de recarga foi dividido em duas categorias: carga sem controle e carga controlada. A diferença entre elas está na existência da comunicação com o operador do sistema. Na primeira não há comunicação, portanto o VE passa a recarregar no instante que é conectado à rede.

Unindo a falta de estrutura pública e a conveniência de realizar recargas em casa, a tendência é que os carros sejam conectados entre 18h e 22h, horário de maior demanda residencial. As consequências disso, em casos de cargas não controladas, podem ser diversas, desde a ativação de unidades geradoras adicionais, a problemas no sistema de distribuição, como: aumento da carga nos transformadores, podendo sobrecarregá-los, maiores perdas no sistema de distribuição, desvios de tensão e aumento da corrente de falta [2]. A própria infraestrutura da residência onde a carga será efetuada deve ser levada em conta, tendo que estar preparada para suportar um aumento no pico de demanda.

Outra adversidade que a recarga de veículos elétricos pode acarretar é a produção de harmônicos, devido à eletrônica de potência inerente aos carregadores. Embora a tecnologia tenha melhorado muito, a distorção harmônica total (THD, na sigla em inglês) no final da carga pode chegar a 28% [18], devido a uma transferência de potência mais baixa.

Em 2012, Massakiti, engenheiro eletricista da Assessoria de Mobilidade Elétrica Sustentável de Itaipu, afirmou que o aumento da penetração de VE não representava uma ameaça do ponto de vista do sistema de geração, porém a renovação na infraestrutura do sistema de distribuição será necessária em um futuro próximo [19]. De fato, um índice de penetração de 6% de PHEVs (quase 3 milhões de veículos) representaria um aumento de menos de 3% da energia total gerada no Brasil em 2012.

A Tabela 2-4 foi elaborada para ilustrar, de forma simplificada, o impacto na rede no momento da recarga, considerando uma taxa de sobreposição de 100% e recarga todos os dias do ano a partir do ponto de depleção total da bateria, i.e. um estado de carga igual a 0%. A dimensão da bateria dos veículos do tipo BEV foi considerada como 20kWh, a do PHEV 11kWh, uma média da energia descrita na Tabela 2-1. Os cálculos de potência e energia foram modelados através das equações (2-1) e (2-2), respectivamente, considerando uma carga CA Nível 1 (Tabela 2-2).

$$P = P_{ch}(\gamma N_{frota}) \quad (\text{Equação 2-1})$$

$$E = P \left(\frac{E_{bat}}{P_{ch}} d \right) \quad (\text{Equação 2-2})$$

em que “ P_{ch} ” é a potência demandada pela recarga, γ é o índice de penetração de VE, “ N_{frota} ” é o montante de automóveis, “ E_{bat} ” é a especificação de energia da bateria e “ d ” quantidade de dias que foi realizada a carga.

Embora as premissas sugeridas para a criação da Tabela 2-4 tenham sido suposições generalistas, percebe-se a importância de levantar estudos considerando a participação dos VE, principalmente nos sistemas de distribuição.

Uma forma sugerida para mitigar o impacto da conexão dos VEs na rede é a recarga inteligente, onde o carro não passa a recarregar imediatamente. Essa recarga só é possível na existência de *Smart Grid*, possibilitando a troca de informações entre o veículo e a rede. Nesses casos, a concentração de recarga do veículo seria de madrugada, quando a demanda é menor. Na necessidade de recarga durante horários de pico, seria realizada com uma potência inferior à nominal dos carregadores.

O perfil da curva de carga do Brasil vem se modificando, principalmente nas regiões Sul e Sudeste, devido à adoção do horário de verão e o uso cada vez mais intensificado de aparelhos de ar condicionado nas residências. Os picos acentuados, que ocorriam a partir das 18h até às 22h, estão desaparecendo, dando lugar a uma curva mais regular. Essa mudança do perfil acaba sendo uma vantagem para a introdução dos VEs, o sistema passou a apresentar maior capacidade para absorver a demanda de recarga, para qualquer índice de penetração, podendo postergar as implementações de *smart grid* [2].

Tabela 2-4: Simulação do impacto energético

Fonte: Elaboração própria a partir de [16-18]

TIPO	PENETRAÇÃO	DEMANDA (GW)	ENERGIA (TWh)	% POTÊNCIA INSTALADA BRASIL (2015)	% ENERGIA GERADA BRASIL (2012)
BEV	0,02%	0,02	0,07	0,01%	0,01%
BEV	6,00%	5,60	21,29	4,09%	3,85%
BEV	19,44%	18,14	68,97	13,24%	12,48%
BEV	50,00%	46,65	177,38	34,05%	32,11%
PHEV	0,02%	0,02	0,04	0,01%	0,01%
PHEV	6,00%	5,60	11,71	4,09%	2,12%
PHEV	19,44%	18,14	37,93	13,24%	6,87%
PHEV	50,00%	46,65	97,56	34,05%	17,66%

2.4 VEHICLE-TO-GRID

Com o aumento da eletrificação da frota de veículos leves percebeu-se que o gerenciamento da energia e o setor de transporte podem ser complementares, dando origem a um conceito novo e ainda em desenvolvimento, conhecido por “Vehicle-to-Grid” (V2G). Na definição mais simplista, V2G é a integração bilateral do veículo com a rede, habilitando o VE a oferecer suporte à rede, como o caso de prestação de serviços ancilares (SAs).

No geral, as redes de energia não apresentam unidades de armazenamento, de forma que geração e transmissão devem coincidir com a demanda instantânea do sistema. Para atender essa necessidade, geradores são ligados e desligados. O armazenamento se torna cada vez mais imprescindível devido à ampliação do uso de fontes renováveis, cuja característica variável de produção dessa energia afeta a confiabilidade do sistema.

A preocupação dos operadores dos sistemas energéticos mundiais vai além da etapa de geração e a diversificação da matriz energética. Os sistemas de transmissão e distribuição, bem como seus equipamentos, foram projetados para demandas menores e cargas essencialmente lineares, o que não corresponde mais à realidade atual. O aumento da demanda reflete nos impostos relacionados a transmissão e distribuição, na falta de energia, black-outs e outros problemas de larga escala. Essas adversidades causam aos EUA um prejuízo de pelo menos U\$79 bilhões por ano [24], portanto é um problema a ser encarado por diversos setores.

No Brasil, energias renováveis intermitentes ainda não representam uma ameaça à operação do sistema, porém o aumento na demanda é constante. Segundo a Empresa de Pesquisa Energética (EPE) o crescimento foi de 4,7% ao ano no quinquênio 2008-2012. Para igualar consumo e geração, muitas usinas termoelétricas foram acionadas, havendo um decréscimo na geração hidrelétrica de 3% entre 2011 e 2012, representando um incremento de 92% na emissão de gases de efeito estufa pelo Sistema Interligado Nacional (SIN) [22].

Para mitigar esses problemas e aumentar a eficiência da produção de energia, permitindo que as usinas operem sem grandes variações durante o máximo de tempo possível, utilizam-se unidades de armazenamento de energia. Hoje em dia, as mais comuns são unidades estacionária, como baterias e ultracapacitores, de pequeno ou médio porte [25]. No SIN o método de armazenamento de energia é basicamente constituído de reservatórios de água da geração hidráulica.

Baterias são formas de armazenamento que vêm se provando eficientes e com tecnologias compatíveis para oferecer estabilidade ao sistema. Uma frota de PHEVs possui uma vasta quantidade de potência disponível [26] e a utilização de suas baterias como unidades de armazenamento de energia é um conceito emergente em que o *Vehicle-to-Grid* se baseia. Quando conectado à rede, o veículo elétrico pode ser interpretado como uma carga

controlada, uma unidade de armazenamento ou um gerador⁵. Segundo [30], a confiança dos sistemas com alto índice de penetração de energias renováveis é reforçada através dessa conexão.

Uma das razões apontadas para o uso de V2G é a melhora da confiabilidade da rede, alinhada com o desejo de postergar alterações no sistema de transmissão e evitar a construção de novas usinas [30].

No âmbito dos veículos, a adoção pode também ser conveniente. É inerente aos automóveis o sistema de armazenagem, e devido as constantes variações de uso durante a atividade de direção, esse sistema deve ser projetado para suportar flutuações de demanda. Além disso, veículos pessoais são usados somente 4% do tempo para transporte, permanecendo os outros 96% estacionados, podendo ser usados para outras funções [3].

Além dos veículos tipo PHEV e BEV, apresentados na seção 2.1, os veículos a célula de combustível também podem operar como V2G. Nesses modelos, a eletricidade é produzida no veículo, durante o processo de direção. A conexão com a rede é necessária para realizar a regeneração dos reagentes, que ocorre através da aplicação periódica de uma corrente elétrica, similar ao que ocorre com as pilhas recarregáveis.

Existem diversos fatores que influenciam na hora de determinar se uma frota de veículos elétricos poderá suprir as necessidades de uma instalação, alguns deles são [25]:

- i. Penetração no mercado;
- ii. Capacidade de armazenamento da bateria;
- iii. Tempo de carga e descarga da bateria;
- iv. Curvas de demanda do local;
- v. Efeitos no meio-ambiente.

O mercado mais promissor a esses veículos é o de serviços ancilares, devido à capacidade do veículo de responder rapidamente, apresentando um estresse mínimo às baterias [3].

Todos VEs (exceto os muito pequenos, como carros de golfe) possuem eletrônica de potência embarcada, com corrente alternada, podendo ser configurada para 60Hz [3]. Contudo, para viabilizar a implementação é crucial a disponibilidade de carregadores bidirecionais,

⁵ Por gerador não deve ser entendido o uso do motor a combustão para gerar eletricidade e prover os serviços requeridos pelo operador do sistema. Os problemas locais nessa operação são diversos, como o aumento das emissões e poluição sonora. Além disso, motores menores são menos eficientes que geradores de grandes usinas e os veículos não possuem sistema de arrefecimento quando parados.

comunicação entre os veículos e a rede de distribuição, além de um medidor de energia embarcado preciso [29].

Uma forma de comunicação preliminar foi sugerida em [3], mostrada na Figura 2-9, onde também é possível entender o fluxo de potência para esse sistema. Os sistemas de geração provêm energia para o sistema de transmissão, representando um percurso unidirecional. Já as outras conexões são intercambiáveis. O operador enviaria o sinal a uma grande quantidade de veículos, sendo eles tratados como individuais (como no caso do canto superior direito da Figura 2-9) ou através de um agregador (canto inferior direito), demandando entrega de potência ou permitindo a recarga dos veículos.

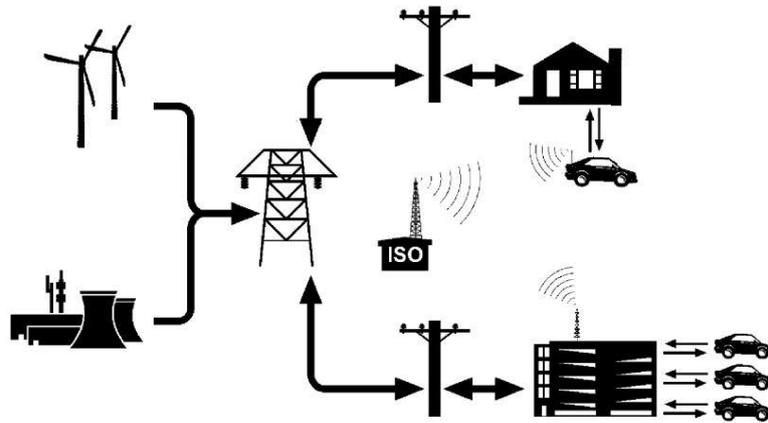
Quando tratados de forma individual, assume-se uma linha direta de comunicação entre o operador do sistema e o veículo. Essa configuração, vista com maiores detalhes na Figura 2-10, é conhecida como “arquitetura direta e determinística” [26], sendo conceitualmente simples, porém de viabilidade questionável. Nela, cada veículo é responsável por ofertar o serviço ancilar enquanto estiver na estação de carga. O contrato de fornecimento é encerrado quando o VE deixa a estação, sendo necessário um novo contrato a cada veículo, ou a cada recarga.

Na arquitetura direta e determinística não é possível utilizar os sinais de controle convencionais, ainda não havendo infraestrutura de comunicação que permita sua implementação. Nessa configuração o operador do sistema deve constantemente atualizar as informações de contrato, conexão, disponibilidade de potência e estado de carga da bateria, além dos requisitos individuais de cada motorista.

A falta de estrutura para realizar a comunicação na arquitetura direta e determinística é atribuída à natureza geográfica aleatória de cada VE e a potência muito baixa, no âmbito da rede, que cada veículo pode entregar. Contudo um agregador (estacionamento, por exemplo) poderia celebrar um contrato, caracterizando a “arquitetura agregativa” [26], Figura 2-11. A inserção de um intermediário entre o operador do sistema e o dono do veículo permite utilizar a infraestrutura existente para contrato de serviços ancilares, devido à potência acumulada naquele estabelecimento. Outro motivo é a previsibilidade da curva de potência, que ocorre por causa da rotatividade desses lugares, onde um carro é rapidamente substituído por outro. Assim, na estrutura agregativa é possível atingir padrões industriais [26], viabilizando a interface entre a rede e o provedor de V2G.

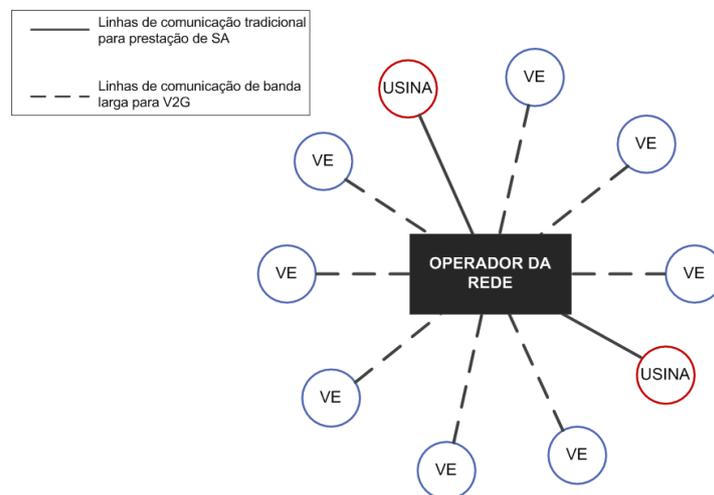
Os canais de controle sugeridos para realizar a comunicação entre o operador da rede (na Figura 2-9 representado como “ISO”, do inglês *Independent System Operator*) e os veículos são sinais de rádio, rede de telefonia móvel, conexão direta à internet ou uma linha de transmissão de energia. O sistema V2G é baseado em um controle constante do estado de cada VE, gerando preocupação quanto à privacidade dos sinais de controle, entretanto o protocolo de comunicação ainda é pouco estudado, sendo proposto raramente na literatura [27],[28].

A interação com o mercado de energia não é escopo desse trabalho. A premissa aqui adotada é que toda potência acumulada disponível no estacionamento do Centro de Tecnologia seria para uso próprio, de forma a suprir os picos de demanda da instalação, mitigando os efeitos causados pelo aumento das cargas nos últimos anos e, possivelmente, retardando as reformas e ampliações que devem ser feitas.



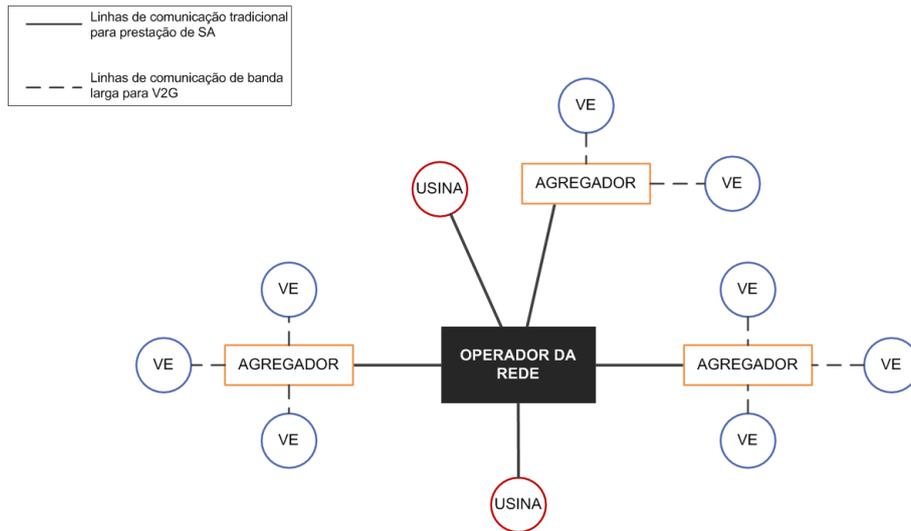
Fonte: [3]

Figura 2-9: Esquemático proposto para fluxo de potência e conexões sem fio entre veículos elétricos e a rede



Fonte: elaboração própria baseada em [26]

Figura 2-10 : Exemplo de comunicação na arquitetura direta e determinística



Fonte: Elaboração própria baseada em [26]

Figura 2-11 : Exemplo de comunicação na arquitetura envolvendo agregadores

A principal limitação apontada em estudos [2], [3], [29], [30] para a adoção do sistema V2G é a capacidade das baterias. As baterias de íon de lítio se popularizaram também no segmento de VE, e embora apresentem uma densidade de energia cerca do dobro de outras baterias, esse fator ainda é um limitante. A densidade de potência, no entanto, não é fator crítico. A (Equação 2-3) modela o limite de potência disponível armazenada nos VE que pode ser fornecida a rede. Pela sua análise, conclui-se que a potência disponível vai depender intrinsecamente do tempo requerido pela rede, que varia conforme o tipo de serviço que irá prestar.

$$P_{V2G} = \eta \frac{E_{disponível}}{t_{despacho}} \quad (\text{Equação 2-3})$$

em que “ η ” é a eficiência do sistema; “ $E_{disponível}$ ” é a energia que pode ser usada por veículo; e “ $t_{despacho}$ ” é o tempo típico de despacho ou definido através de contratação.

Outra barreira para a implementação é a necessidade de redes inteligentes para controle da carga. Os custos para adequação da infraestrutura são elevados [31], além de apresentar problemas técnicos. Há ainda a incerteza da aceitação generalizada do V2G, devendo ser levados em consideração os impactos sócio-técnicos, como a relação entre práticas comerciais e regimes regulatórios.

Um modelo mais simples de Vehicle-to-Grid é o Vehicle-to-Home (V2H), onde um único veículo é responsável por oferecer suporte a uma casa. Embora pouco flexível, sua operação é simplificada, precisando de poucas mudanças de infraestrutura, apresentando perdas desprezíveis na transmissão [31]. As aplicações do V2H estão ligadas a nivelamento da curva de demanda da casa, resultando em uma carga mais controlável para a rede, ou ao uso como fonte de emergência, no caso de corte de luz pela distribuidora.

As montadoras japonesas com maior participação no mercado de VEs testam esse tipo de sistema desde 2012, tendo já produzido equipamentos para tal.

O projeto da Nissan requer apenas a instalação de um sistema de controle (Power Control System – PCS) no quadro de distribuição da residência, conectado ao carregador rápido de corrente contínua. Através do PCS a conversão é realizada tanto de corrente contínua de alta tensão para corrente alternada, utilizada para suprir a demanda, quanto de corrente alternada para contínua, recarregando a bateria do carro. O PCS também é responsável pelo controle do fluxo de energia. A potência nominal do conversor é de 6kW [32].

2.5 SERVIÇOS ANCILARES (SA)

Um sistema elétrico ideal possui tensão e frequência constantes, sendo livre de distorção harmônica e com fator de potência idealmente igual a 1, independente do montante de carga. Os Serviços do Sistema Elétrico devem ser providos de forma a manter o sistema o mais próximo possível desse ideal.

Em sistemas com alta penetração de energias renováveis, dependentes de uma previsão do tempo precisa, é comum o desequilíbrio entre demanda e geração. Esse desequilíbrio acarreta em diversos problemas como instabilidade de frequência e flutuação de tensão, podendo gerar um efeito cascata terminando em cortes de carga ou de geração. No Brasil, esse efeito é agravado pelo fato do consumo ser realizado distante da geração.

A confiabilidade de um sistema elétrico de potência é retratada através de três pilares: qualidade, suficiência e segurança [33]. O primeiro é caracterizado através das frequências de tensão e corrente. O segundo representa a existência de instalações suficientes para satisfazer a demanda de todos os consumidores em qualquer momento. Por último, segurança é definida como a habilidade do sistema enfrentar diversos distúrbios. A segurança de um sistema elétrico pode ser entendida como bem público [33], portanto não é clara a delimitação de custo por usuário.

A fim de aumentar o grau de confiabilidade do sistema e operar de forma competitiva, o setor elétrico passou por uma reestruturação administrativa, separando o fornecimento de energia elétrica em produto e serviços. A Figura 2-12 ilustra essa nova divisão. Os Serviços do Sistema – Transmissão, Operação, Administração e Serviços Ancilares, podem pertencer a diferentes agentes, devendo ser comprados em base comercial.

A garantia da qualidade de energia está agora associada aos Serviços Ancilares (SA), também chamados de complementares ou auxiliares, porque têm como função complementar os serviços primários, pelos quais os consumidores pagam diretamente, como por exemplo capacidade, consumo de energia, distribuição, etc.

Serviços Ancilares são, na prática, requisitos técnicos, constituídos de recursos ou ações que asseguram a operação eficiente, garantindo a continuidade de fornecimento, segurança do sistema e a qualidade da energia, portanto englobam diversos serviços complementares, compreendendo os agentes de geração, transmissão e distribuição.

Os procedimentos para prestação de SAs no Brasil são previstos pela Resolução N° 265/03 da ANEEL, sendo os serviços definidos no Artigo 2°. O Módulo 14 do Procedimento de Rede (PROREDE, 2009) e o Módulo 8 do Procedimento de Distribuição (PRODIST, 2010) foram motivados por essa resolução.

Nesses Procedimentos constam como SA os controles primário e secundário de frequência, as reservas de prontidão, o suporte de reativos e o auto-restabelecimento das unidades geradoras. Na literatura há identificação de vários outros serviços individuais e sua classificação varia dependendo da estrutura da rede e das políticas de operação. Nos estudos de V2G, que ocorrem principalmente na Europa e norte dos Estados Unidos, um dos serviços oferecidos pelo mercado é o nivelamento de carga e suprimento de pico de demanda (*load leveling and peak power*) que é de interesse para este projeto.

A definição dos provedores e usuários dos SAs é mandatória para atribuição correta do valor do serviço. O maior fornecedor de SAs para a rede são os geradores, responsáveis por controle de tensão e frequência, reserva girante e auto-restabelecimento (*black start*). Já os usuários são os operadores, concessionárias e o consumidor final, que faz uso dos benefícios proporcionados pelos serviços ancilares.

Segundo [34], faz-se necessário também a distinção entre os serviços indispensáveis para o correto funcionamento do sistema, sendo esses de responsabilidade do operador da rede, e aqueles que são solicitados por consumidores individuais.

No Brasil, é responsabilidade do ONS a contratação e administração de serviços ancilares necessários à operação do Sistema Interligado Nacional [35], os agentes prestadores são as unidades geradoras. A Figura 2-13 representa o processo administrativo, relacionando os agentes e as entidades envolvidas (ANEEL, ONS, CCEE).

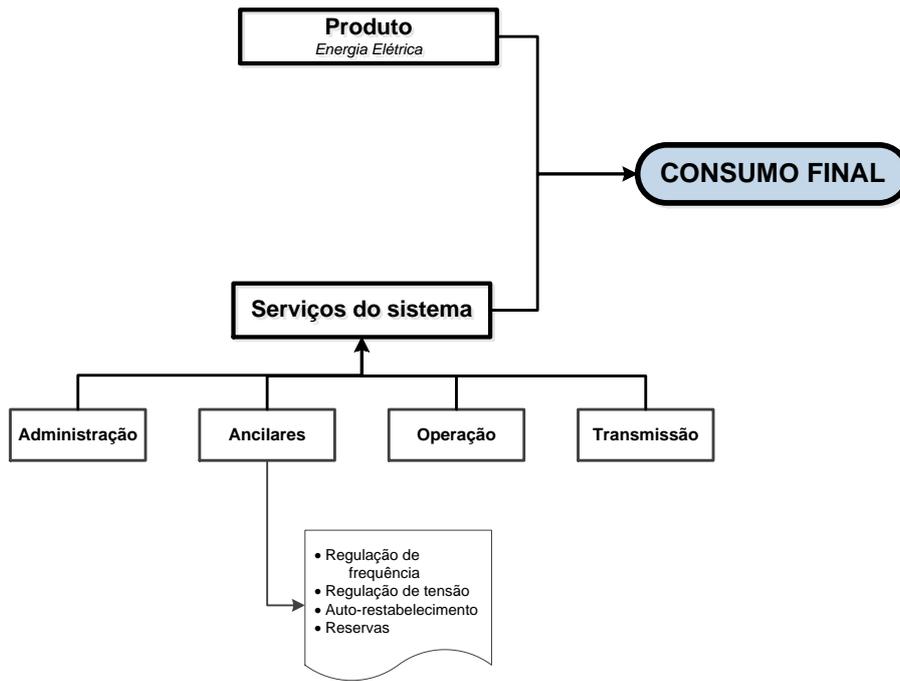
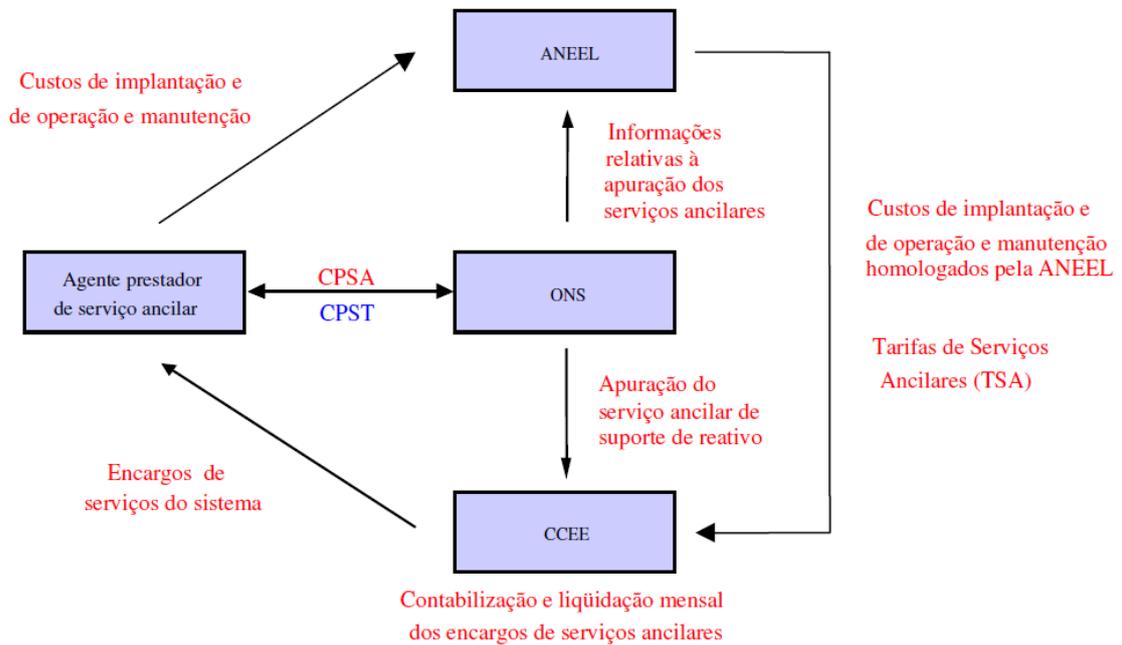


Figura 2-12: Divisão do novo mercado de energia elétrica



Fonte: [35]

Figura 2-13: Processo de administração dos serviços ancilares

2.5.1 IDENTIFICAÇÃO DOS SERVIÇOS ANCILARES

2.5.1.1 RESERVAS

Em um mercado competitivo, reservas de geração devem ser identificadas e classificadas como serviço ancilar, sendo remunerados como tal. Embora possa parecer vantagem receber por uma potência que não está sendo despachada, os geradores respondem aos sinais de controle mudando seu ponto ótimo de geração, o que pode acarretar em custos adicionais na operação. A provisão de reservas é prevista na Resolução ANEEL N° 265, representando um serviço essencial para a estabilidade do sistema elétrico, pois tem a finalidade de compensar déficits de potência.

São considerados três mercados de reservas operativas: regulação, reserva girante e reserva não-girante.

A denominação reserva girante vem do termo inglês *spinning reserve*. São reservas que devem ter rápida atuação, provendo energia adicional em um curto espaço de tempo, respondendo a mudanças na frequência causadas por alteração não programada na carga, caracterizadas por saídas de geradores ou linhas de transmissão. Corresponde à diferença entre o montante de potência disponível das unidades geradoras que já se encontram sincronizadas com a rede e a demanda total do sistema.

As reservas não-girantes (*non-spinning*), ou reservas suplementares, são aquelas que não precisam responder de forma imediata. É a parcela de reserva que não está em funcionamento, mas pode ser sincronizada à rede e ter sua potência despachada. Pode substituir ou complementar o montante de reserva girante e é composta de unidades operando a vazio.

A interação entre os mercados de reserva é possível, desde que respeitando uma hierarquia. Serviços com capacidade de resposta rápida são considerados de maior qualidade, portanto a ordem decrescente de qualidade é: Regulação, Girante e Não-girante. Um serviço de maior qualidade pode atender um de menor qualidade [36], mas o contrário não é possível. A ordem e o sentido da substituição são destacados na Figura 2-14.

As reservas são divididas em quatro parcelas distintas [37], a saber:

i. Reserva primária (R1): parcela de potência ativa destinada ao controle primário de frequência do sistema interligado. É executada pelos Agentes Geradores, correspondendo a 1% da Responsabilidade Própria de Geração (RPG). A utilização desta parcela é feita automaticamente pelos reguladores de velocidade das unidades geradoras.

ii. Reserva secundária (R2): constituída de reserva girante, é a parcela de potência ativa destinada a realizar o controle secundário de frequência e/ou intercâmbios líquidos de potência ativa entre áreas de controle. É alocada em unidades

participantes do Controle Automático de Geração (CAG), correspondendo a 2,5% da RPG, acrescida de 1,5% da carga própria do Agente Distribuidor. A utilização é feita automaticamente pelo CAG. Eventualmente podem ser utilizadas para complementar reserva terciária.

iii. Reserva terciária (R3): parcela destinada a cobrir saídas ou limitações não programadas das unidades geradoras. É constituída de reserva girante, preferencialmente alocada em unidades sob o controle do CAG. O valor total da R3 no SIN é dado por um cálculo probabilístico.

iv. Reserva complementar (R4): parcela dedicada a recompor a R3 nos casos de emergências de longa duração. É constituída pela soma dos seguintes recursos disponíveis: cargas de bombeamento, cargas interrompíveis, geração hidráulica ou térmica a carvão excedente, geração térmica a óleo combustível e reprogramações de manutenções de unidades geradoras, sendo características de cada área de controle. Deve estar disponível em até 24h.



Figura 2-14: Hierarquia para substituição dos tipos de reserva

2.5.1.2 REGULAÇÃO DE FREQUÊNCIA

A frequência é uma medida do balanço de potência ativa do sistema. Quando há acréscimo de carga no sistema sem aumento do fluxo de potência ativa, os geradores sofrem redução de velocidade, implicando em uma alteração na frequência da rede. A segurança é mantida através de reservas de potência ativa.

De acordo com o Módulo 8 do Procedimentos de Distribuição (PRODIST) as instalações de geração conectadas ao sistema de distribuição devem operar dentro dos limites de 59,9 Hz e 60,1 Hz. A regulação de frequência é dada em diversos níveis.

- i. Controle primário de frequência: limita a frequência quando há desequilíbrio entre carga e geração através de um regulador de velocidade associado à turbina acoplada ao rotor do gerador. Aqui está incluída a provisão de reserva primária de potência ativa. Esse serviço é hoje suprido por todas as unidades geradoras ligadas ao SIN.

- ii. Controle secundário de frequência: restabelece a frequência do sistema ao seu valor de operação e/ou equilibra o fluxo de potência ativa através do Controle Automático de Geração (CAG). O CAG é um controle centralizado, presente em geradores selecionados do sistema, sendo idealmente hidrogeradores de grande porte posicionados em locais estratégicos para o SIN. A esse serviço ancilar está associada uma reserva de potência secundária, que deve ser fornecida quando solicitada pelo Operador Nacional do Sistema (ONS).
- iii. Regulação terciária: destina-se a manutenção da frequência quando há grande desequilíbrio instantâneo entre geração e carga, como no caso de um defeito em linha de transmissão ou saída não prevista de um gerador. Para que o sistema possa responder rapidamente a esta súbita variação, torna-se necessário manter uma significativa reserva de potência ativa já sincronizada com a frequência do sistema, e/ou em unidades disponíveis para rápida sincronização à rede [38].
Outra forma de se obter esse controle é através dos Esquemas Regionais de Alívio de Cargas, onde há cortes automáticos de carga.

2.5.1.3 REGULAÇÃO DE TENSÃO

A eletrônica de potência, atualmente empregada em muitos equipamentos elétricos, está nos dois lados do problema de qualidade de energia, podendo causar perturbações na rede e também sendo sensível às flutuações de tensão. Se a magnitude da tensão varia durante poucos ciclos, ou em uma frequência crítica, causa variações na potência que flui para o equipamento, podendo acarretar em seu mau funcionamento. Dessa forma, o controle da tensão se faz necessário para evitar prejuízos pelo mau desempenho ou danos [39].

A variação da amplitude da tensão pode ser classificada como uma sobretensão ou subtensão. A primeira implica em um aumento na tensão normativa de operação ocorrendo, principalmente, devido a descargas atmosféricas, operações de chaveamento, redução repentina na carga total do sistema, curtos-circuitos monofásicos e não-linearidades [39]. Quando em um curto período de tempo, é também chamada de sobretensão transitória ou picos de tensão.

Subtensões de curta duração são conhecidas por “afundamentos de tensão”. Normalmente, são causadas por defeitos na rede (curto-circuito) ou pela partida de motores. São problemas que podem ocorrer a quilômetros de distância do ponto de utilização, sendo vistos como um problema global [39], diferentemente de problemas de falta de energia, que, em geral, são originados nas distribuidoras.

Problemas de subtensão de longa duração são corriqueiros nas alimentações radiais, que são arranjos comuns em sistemas de distribuição em média tensão. Nesses casos, a tensão apresenta um comportamento monótono decrescente, portanto as cargas que estão na ponta da distribuição são alimentadas com uma tensão inferior a das mais próximas da

subestação. Essas questões influenciam no fluxo tanto da potência ativa quanto na potência reativa.

A regulação de tensão é realizada através da injeção ou absorção de potência reativa na rede por geradores ou equipamentos de transmissão [33], dessa forma é também conhecida por “Suporte de Reativos”. Na Resolução ANEEL N° 265 é previsto que todas as unidades geradoras do SIN que estejam fornecendo potência ativa, devem prover a regulação sempre que solicitado pelo Operador Nacional do Sistema (ONS). O ideal é que esse SA seja alocado o mais próximo do lugar onde ele é necessário, porque a transmissão de reativos resulta em perdas e diminui a capacidade de transmissão de potência ativa.

Tensões superiores a 1kV contratada junto à distribuidora devem se situar entre 95% e 105% da tensão nominal de operação do sistema no ponto de conexão comum (PCC). Para uma tensão contratada de valor igual ou inferior a 1kV a distribuidora deve garantir a entrega da tensão nominal. Em caso de instalações 220/127V, a tensão fase-fase é considerada adequada entre 202V e 231V [40].

2.5.1.4 BALANÇO DE DEMANDA

A demanda de energia elétrica dos consumidores muda constantemente e a determinação desse valor pode ocorrer de duas formas: probabilística ou considerando um teor transitório. No primeiro caso, a demanda é caracterizada pelo período de tempo que ocorre, i.e., sazonal, semanal, diária ou por hora. Caso a demanda seja representada pelo teor transitório, verifica-se, por exemplo, as flutuações devido a ações individuais e diferenças na eficiência da transmissão de energia.

Embora o provimento de balanço de demanda como SA ainda não esteja previsto nas resoluções da ANEEL, a tendência internacional é identificar esses serviços como complementares ao produto energia elétrica [3],[29],[41].

A demanda pode ser balanceada em um sistema interligado através de três ações: nivelamento da curva de carga, suprimento de picos de demanda e corte de carga (*peak shaving*).

O nivelamento da curva de carga consiste em equilibrar o sistema através do deslocamento de cargas para horários de baixa demanda, fazendo com que a própria geração já existente atenda às cargas.

Suprir picos de demanda consiste em armazenar energia durante os períodos de carga leve para ser despachado durante períodos de alta demanda. Um sistema de armazenamento de energia (no inglês, *Energy Storage System – ESS*) é responsável por prestar suporte à

rede, reduzindo a demanda a ser suprida por unidades geradoras economicamente ineficientes.

O corte de carga não visa uma operação econômica, mas sim a mera redução de demanda durante horários de pico. Seu objetivo é simples: evitar a expansão da capacidade da instalação. Locais que possuem o recurso de *peak shaving* normalmente não estão sob o controle da concessionária de distribuição, sendo propriedades do dono da instalação.

Para que esse SA possa entrar em operação como mercado individual é necessária a implementação de medidores inteligentes (*smart meters*) ou precificação em tempo real.

2.5.1.5 OUTROS

Outros Serviços Ancilares identificados na Resolução ANEEL nº 265 são o Auto-restabelecimento (*black start*) e o Sistema Especial de Proteção (SEP). O primeiro é diretamente ligado às unidades geradoras, representando a capacidade de sair da condição de parada total para condição de plena operação, sem utilizar fonte externa. O SEP é um sistema de proteção que realiza ações automáticas para preservar a integridade do SIN, abrangendo os Esquemas de Controle de Emergência (ECE), os Esquemas de Controle de Segurança (ECS) e as proteções de caráter sistêmico.

Não há indícios, ou estudos, apontando que veículos elétricos são viáveis de atuar nesses setores, portanto não estão no escopo deste trabalho.

2.5.2 PRESTAÇÃO DE SERVIÇOS ANCILARES ATRAVÉS DE VES

Os veículos elétricos do tipo BEV e PHEV apresentam conectividade à rede, tendo oportunidade não só de carregar, mas também de descarregar, injetando potência na rede. A bateria presente nesses veículos serve como unidade de armazenamento de energia, podendo oferecer diversos tipos de suporte. O mercado mais promissor a esses veículos é o de serviços ancilares, devido à capacidade do veículo de responder rapidamente, apresentando um estresse mínimo ao sistema de armazenamento. Diversos estudos [3],[29],[30],[33] estão sendo levantados na prestação dos seguintes serviços: suprimento de pico de demanda, balanceamento de cargas, regulação de frequência e regulação de tensão.

Tendo em vista a venda do serviço para a concessionária é improvável que sejam realizados contratos individuais com os donos dos carros, pois a máxima potência que pode ser entregue individualmente é muito baixa no âmbito da rede. Contudo um agregador (estacionamento, por exemplo) poderia celebrar um contrato, já que há o acúmulo de potência disponível. Além disso, há a rotatividade desses lugares, onde um carro é rapidamente substituído por outro, fazendo com que a curva de disponibilidade de potência seja mais

previsível. Também apresenta uma vantagem para o dono do veículo, que não precisaria ter conhecimentos específicos para interagir com o mercado de energia, sendo necessário somente um acordo com o agregador.

A interação com o mercado de energia não é escopo desse trabalho. A premissa aqui adotada é que toda potência acumulada disponível no estacionamento do Centro de Tecnologia seria para uso próprio, de forma a suprir os picos de demanda da instalação, mitigando os efeitos causados pelo aumento das cargas nos últimos anos e, possivelmente, retardando as reformas e ampliações que devem ser feitas.

Existem diversos fatores que influenciam na hora de determinar se uma frota de veículos elétricos poderá suprir as necessidades de uma instalação, alguns deles são [25]:

- i. Penetração no mercado;
- ii. Capacidade de armazenamento da bateria;
- iii. Tempo de carga e descarga da bateria;
- iv. Curvas de demanda do local;
- v. Efeitos no meio-ambiente.

Para a viabilidade da implementação é crucial a disponibilidade de carregadores bidirecionais. Para ter melhor controle, necessita-se ainda de comunicação entre os veículos e a rede de distribuição, além de um medidor preciso para saber o nível de carga da bateria [3].

No próximo capítulo, os aspectos mostrados acima serão aplicados na formulação de um estudo de caso para nivelamento de carga e suprimento de picos de demanda para a rede do Centro de Tecnologia da UFRJ.

3 FORMULAÇÃO DA PROPOSTA

3.1 ANÁLISE DA INSTALAÇÃO

O Centro de Tecnologia (CT) da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) foi inaugurado em 1970 através do Plano de Reestruturação da UFRJ. Hoje ele é composto por duas Unidades e três órgãos suplementares, sendo eles a Escola Politécnica, Escola de Química, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE), Instituto de Macromoléculas (IMA) e Núcleo Interdisciplinar de Desenvolvimento Social (NIDES). As Unidades e órgãos suplementares somam cerca de 650 professores, 7875 alunos, incluindo graduação e pós-graduação, e 600 servidores técnico-administrativos.

Somente pela quantidade de pessoas que circulam diariamente nas instalações do Centro de Tecnologia e o aumento contínuo da dependência de energia elétrica, já se espera um consumo elevado. Como fator agravante para o aumento de demanda, recentemente muitas salas e laboratórios foram equipados com aparelhos de ar condicionado. Com isso, por diversas vezes nos últimos anos, o CT demandou uma potência muito superior à contratada, o que implicou não só em um aumento exorbitante da conta de energia, mas também na sobrecarga dos alimentadores. Essa última questão altera consideravelmente a vida útil dos equipamentos e a segurança da operação, o que levou a concessionária Light Serviços de Eletricidade S.A. a advertir o corte de energia caso fosse desrespeitado o limite do alimentador.

Em dezembro de 2014 a comunidade do Centro de Tecnologia foi informada a respeito do Plano de Contingência para Energia Elétrica do CT, onde ficou determinado que o corte pode ser realizado quando no uso do alimentador principal a demanda ultrapassasse o limite contratado de 6,6 MW ou o limite de 5,3 MW, no caso do uso do alimentador reserva.

Para conhecer melhor o perfil de curva de carga do CT e estimar o aumento do consumo para os próximos anos, foram solicitados à Light os registros dos últimos 38 meses da memória de massa do medidor de energia do CT, correspondendo à janela de Fevereiro de 2012 a Março de 2015. Segundo [42] o intervalo de 24 meses já seria o suficiente para estudar a relação entre hábitos e consumos de um consumidor.

Os consumidores são categorizados em dois grupos: Grupo A e Grupo B. A principal diferença entre os grupos está na tensão de atendimento e, conseqüentemente, na função de demanda. Consumidores classificados no primeiro grupo são atendidos com uma tensão superior a 2300 V, com tarifação constituída por preços aplicáveis ao consumo de energia elétrica ativa e à demanda faturável⁶ (tarifação binômica). Em geral, são grandes complexos prediais, como shopping centers, indústrias ou condomínios. Já os do Grupo B possuem

⁶ A definição de demanda faturável depende do modo de tarifação da instalação. Em termos gerais, é um valor de potência ativa considerado para faturamento, com aplicação das respectivas tarifas, sendo expressa sempre em quilowatts (kW).

alimentação em baixa tensão, com tarifação constituída por preços aplicáveis somente ao consumo de energia elétrica ativa (tarifação monômnia).

A tarifação para o Grupo A pode ser realizada em três modalidades: convencional, horo-sazonal verde ou horo-sazonal azul. Na modalidade convencional, a demanda contratada é fixa, independente do horário ou período do ano. Em caso de medição superior em 10% da demanda contratada, cobra-se uma tarifa de ultrapassagem. Somente instalações com demandas inferiores a 300 kW podem ser enquadradas nesse modo tarifário.

A tarifa horo-sazonal verde permite ao consumidor alterar somente a demanda contratada nos períodos do ano, enquanto a tarifa azul permite contratação diferente também na hora do dia (ponta ou fora de ponta). Em ambos os casos, a conta de energia elétrica é composta pelo consumo, demanda e ultrapassagem da demanda contratada.

As medições de demanda de potência ativa são realizadas em intervalos de 15 minutos, de forma que o consumo de energia elétrica mensal é dado pela área abaixo da curva formada pelos pontos medidos. É importante salientar que a demanda medida é a máxima ocorrida durante o período de faturamento, isso implica em uma cobrança mensal baseada em 15 minutos de utilização [42].

O Centro de Tecnologia se enquadra no Grupo A, Subgrupo A4, caracterizando uma alimentação no nível de tensão entre 2,3 kV e 25 kV, com tarifa binômnia. Sua estrutura tarifária é a horo-sazonal verde.

Na Tabela 3-1 são listados os valores de consumo de energia, calculados através da regra do trapézio, a demanda máxima, a demanda média por cada mês informado pela concessionária, além da demanda contratada. A partir desses dados, foram traçados os gráficos das Figuras Figura 3-1, Figura 3-2 e Figura 3-3. Pela análise dos gráficos, percebe-se que as medidas da Decania do Centro de Tecnologia para controlar as cargas conectadas, com a troca de equipamentos por outros mais eficientes e a conscientização da comunidade, está surtindo efeito. A demanda de potência para fevereiro e março de 2015 foi menor que as de 2012. Portanto, não há como afirmar que a demanda do CT está seguindo o aumento de demanda nacional, nem fazer outra previsão de crescimento de demanda para os próximos anos.

É possível também notar a clara diferença de demanda nos períodos secos (Maio a Novembro) e úmidos (Dezembro a Abril). Em 2013, ano que foi fornecido informação de todos os meses, a diferença de demanda medida nos períodos chega a ser mais de 20%.

A demanda contratada pode ser ultrapassada em 10% sem acarretar em custos adicionais à conta de luz. Entretanto, em 72% dos meses coletados a demanda medida superou esses valores.

Tabela 3-1 : Consumo e demandas do Centro de Tecnologia entre os anos de 2012 e 2015

MÊS/ANO	CONSUMO (kWh)	DEMANDA MÉDIA (kW)	DEMANDA MÁXIMA (kW)	DEMANDA CONTRATADA (kW)
fev/12	1.672.542,00	1.745,28	5.685,12	4.700,00
mar/12	1.761.527,52	1.607,04	6.359,04	4.700,00
abr/12	1.858.546,08	1.693,44	6.177,60	4.700,00
mai/12	1.556.373,96	1.382,40	5.175,36	4.100,00
jun/12	1.325.209,68	1.434,24	5.132,16	4.750,00
jul/12	1.215.435,24	1.399,68	4.337,28	4.750,00
ago/12	1.296.772,20	1.416,96	3.870,72	4.750,00
set/12	1.498.239,72	1.408,32	5.279,04	4.750,00
out/12	1.602.427,32	1.520,64	5.901,12	4.750,00
nov/12	1.620.259,20	1.460,16	6.298,56	4.750,00
dez/12	1.726.929,72	1.658,88	6.350,40	5.050,00
jan/13	1.417.050,72	1.313,28	5.702,40	4.700,00
fev/13	1.515.303,72	1.468,80	6.523,20	4.700,00
mar/13	1.788.707,88	1.710,72	6.341,76	4.700,00
abr/13	1.523.815,20	1.503,36	5.443,20	4.700,00
mai/13	1.303.983,36	1.416,96	5.356,80	4.100,00
jun/13	1.453.745,88	1.399,68	4.415,04	4.750,00
jul/13	1.310.538,96	1.382,40	4.242,24	4.750,00
ago/13	1.330.103,16	1.308,96	4.104,00	4.750,00
set/13	1.496.734,20	1.477,44	5.641,92	4.750,00
out/13	1.574.538,48	1.434,24	5.590,08	4.750,00
nov/13	1.639.051,20	1.555,20	6.454,08	4.750,00
dez/13	1.554.211,80	1.607,04	6.480,00	5.050,00
jan/14	1.331.737,20	1.313,28	5.123,52	4.700,00
fev/14	1.880.358,84	1.788,48	6.384,96	4.700,00
mar/14	1.712.143,44	1.589,76	6.575,04	4.700,00
abr/14	1.753.478,28	1.555,20	6.151,68	4.700,00
mai/14	1.327.881,60	1.408,32	4.959,36	4.100,00
jun/14	1.258.137,36	1.399,68	4.890,24	4.750,00
jul/14	1.161.023,76	1.270,08	3.559,68	4.750,00
ago/14				4.750,00
set/14	1.419.896,52	1.416,96	5.132,16	4.750,00
out/14	1.632.829,32	1.486,08	5.417,28	4.750,00
nov/14	1.693.660,32	1.615,68	6.108,48	4.750,00
dez/14				5.050,00
jan/15	1.403.898,48	1.399,68	5.365,44	4.700,00
fev/15	1.582.960,32	1.520,64	5.374,08	4.700,00
mar/15	1.665.409,68	1.607,04	6.022,08	4.700,00

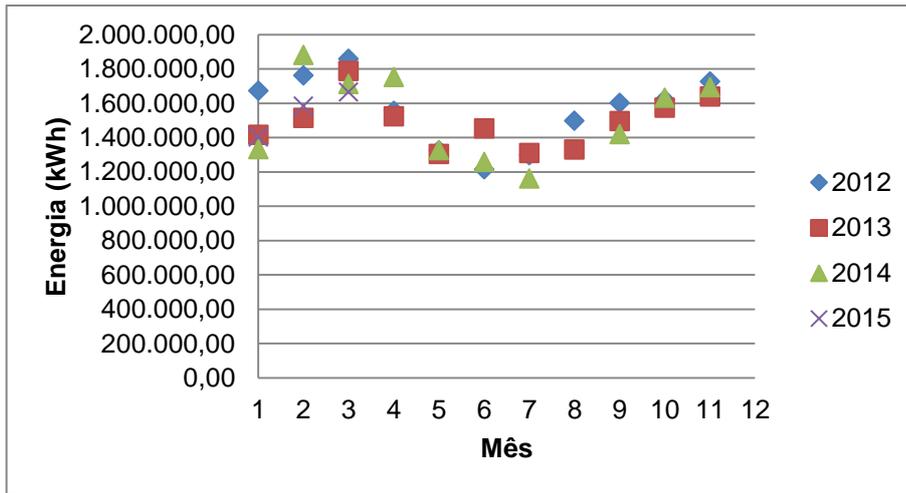


Figura 3-1: Perfil do consumo de energia elétrica em kWh por mês

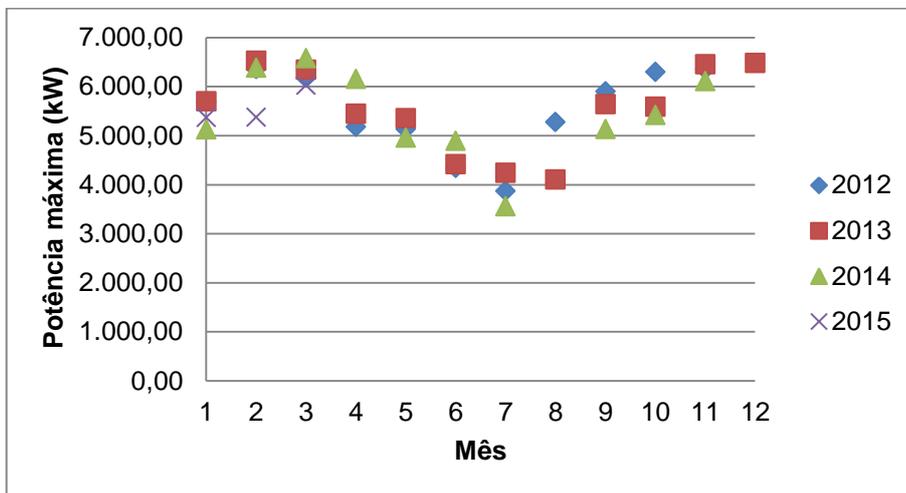


Figura 3-2: Perfil da demanda medida em kW por mês

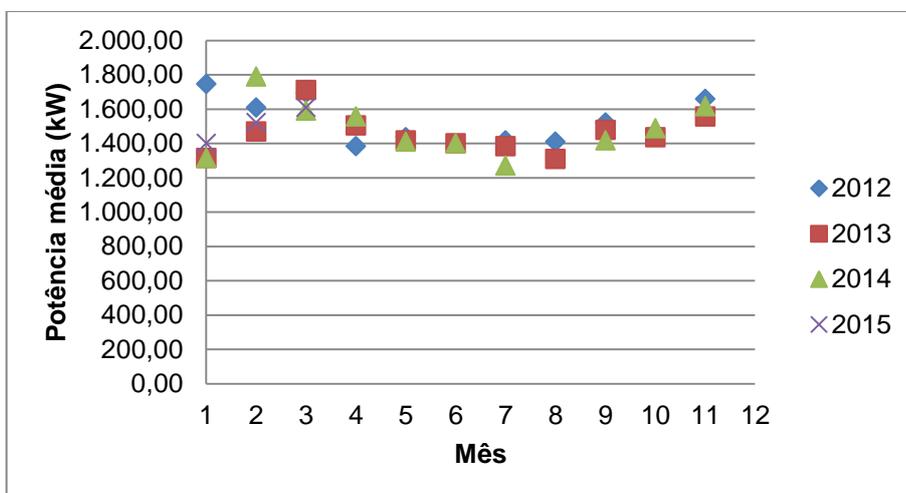


Figura 3-3: Perfil da demanda de potência média em kW por mês

Percebe-se que as demandas máximas e médias são bem diferentes. Isso acontece devido ao uso do CT se concentrar em uma janela de tempo. É essencial para a aplicação do conceito de V2G conhecer o comportamento da curva de carga em cada horário. Para obter um valor mais preciso da carga conectada, optou-se por fazer a média da demanda de potência ativa em todos os dias, separando-se os dias úteis dos finais de semana.

Embora os valores se alterem entre os períodos seco e úmido, o perfil de carga é bem parecido, apresentando um aumento considerável a partir das 9h até às 16h, tendo um pico mais acentuado entre 11h e 15h. A Figura 3-4 e a Figura 3-5 ilustram o perfil de carga dos dias úteis, levantado através das médias dos dados fornecidos pela concessionária.

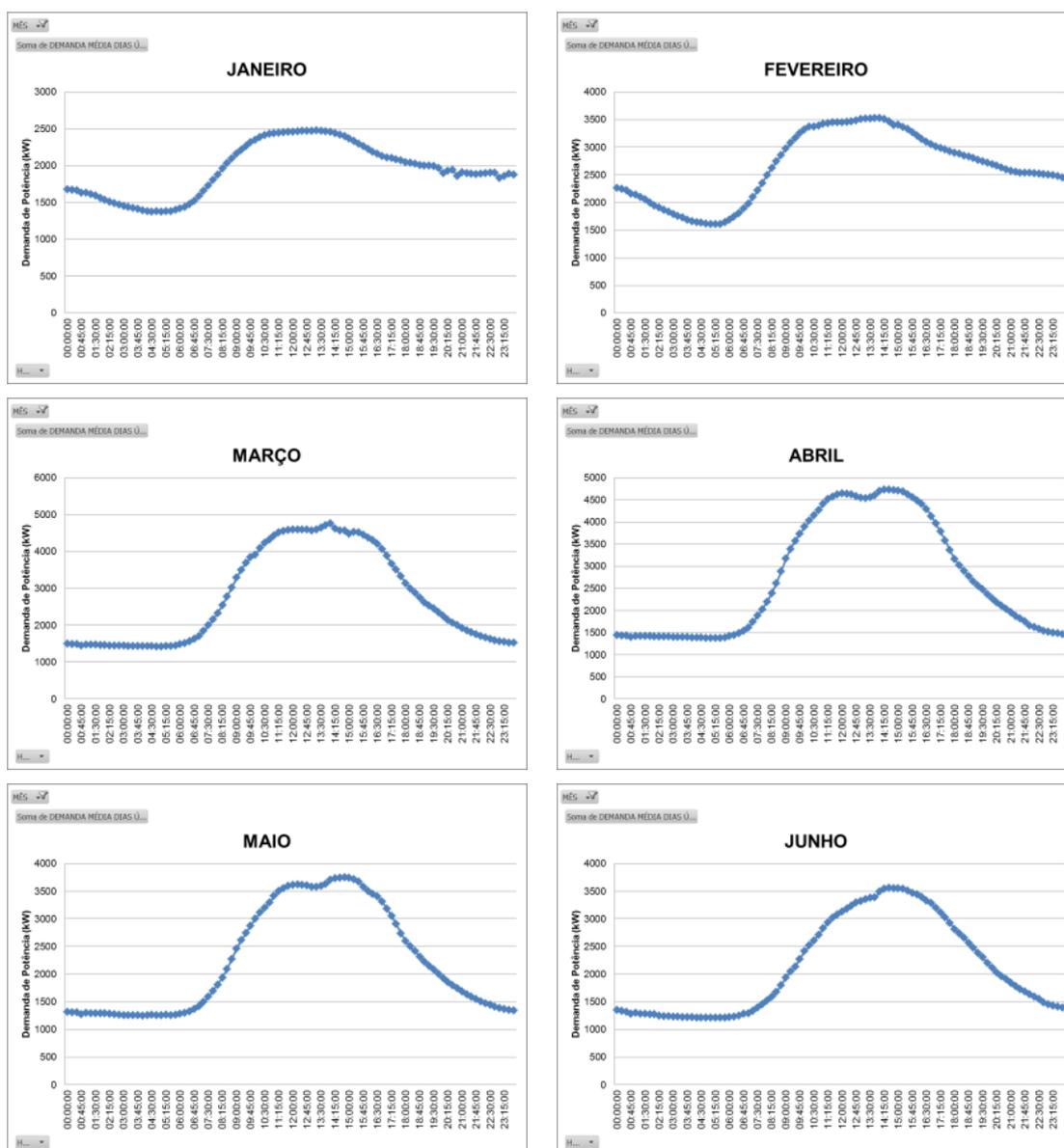


Figura 3-4: Curvas de demanda média do primeiro semestre para cada mês, considerando os valores dos 38 meses estudados

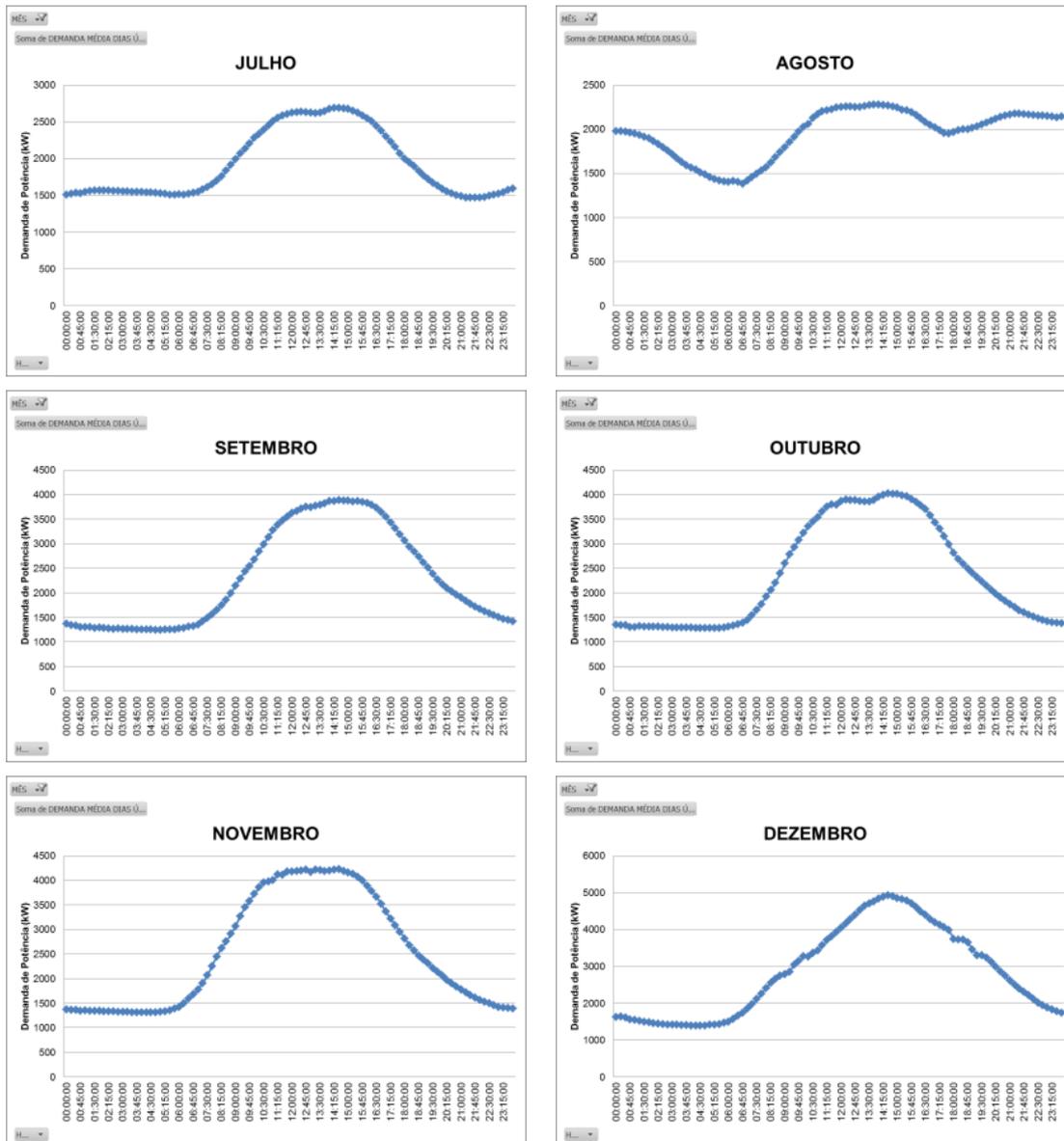


Figura 3-5: Curvas de demanda média do segundo semestre para cada mês, considerando os valores dos 38 meses estudados

Em abril de 2014, o Fundo Verde divulgou os resultados de uma pesquisa de origem-destino da população da Ilha do Fundão [43]. A amostragem foi de 10%, sendo a maior parte das respostas (40%) do Centro de Tecnologia, totalizando a participação de 3281 pessoas. Essa pesquisa foi utilizada para estimar a localidade dos veículos que estacionam no CT.

No primeiro semestre de 2015, um dos setores do estacionamento estava em obra, portanto a disponibilidade de vagas total era para 1455 veículos. A Tabela 3-2 sumariza as informações disponibilizadas em [43] e mostra a previsão da quantidade de veículos por localidade.

Tabela 3-2: Quantidade de veículos esperada por Zona Administrativa

ZONA ADMINISTRATIVA	PESSOAS QUE RESPONDERAM A PESQUISA	PORCENTAGEM DE PESSOAS ENTREVISTADAS	QUANTIDADE DE VEÍCULOS ESPERADA
Baixada - Duque de Caxias	93	2,83%	41
Baixada - Leste	94	2,86%	42
Baixada - Oeste	54	1,65%	24
Baixada - Xerém	1	0,03%	0
Bangu	80	2,44%	35
Barra da Tijuca	240	7,31%	106
Botafogo	754	22,98%	335
Campo Grande	50	1,52%	22
Centro	138	4,21%	61
Ilha do Governador	335	10,21%	149
Inhaúma	30	0,91%	13
Irajá	0	0,00%	0
Jacarepaguá	197	6,00%	87
Madureira	124	3,78%	55
Méier	198	6,03%	88
Niterói	281	8,56%	125
Pavuna	44	1,34%	20
Penha	55	1,68%	24
Ramos	74	2,26%	33
Santa Cruz	9	0,27%	4
São Cristóvão	1	0,03%	0
Tijuca	429	13,08%	191
Vigário Geral	0	0,00%	0
TOTAL	3281	100,00%	1455

Objetivando contabilizar a potência disponível armazenada nas baterias dos VEs que estacionariam no Centro de Tecnologia, estimou-se a distância entre os bairros e a Ilha do Fundão utilizando o Google Maps. A velocidade média desenvolvida no percurso foi calculada de acordo com o tempo gasto no trânsito considerando o trânsito de uma segunda-feira aleatória às 7h. Esses valores são apresentados na seção de premissas.

3.2 VEÍCULO SELECIONADO PARA ESTUDO

O VE utilizado nos estudos é o Nissan LEAF, o veículo puramente elétrico mais vendido no mundo. Ele é do tipo BEV, portanto a bateria de íon de lítio (Li-íon) é a única fonte para a tração do veículo, equivalendo ao tanque de combustível de um carro com propulsão a combustão. Como nos automóveis convencionais, existe ainda uma bateria auxiliar de 12 V, recarregada automaticamente por essa bateria principal.

O manual de usuário do LEAF propõe três tipos de carga: *normal charge*, *trickle charge* e *quick charge*. A primeira é a carga lenta, realizada através da estação de carga que pode ser instalada em qualquer local, operando em 220V com potências de 3,3kW ou 6,6kW, leva entre 4 e 7 horas para que a carga seja completa. A segunda é dada através de tomadas residenciais (127V/20A) necessitando de cerca de 21 horas para atingir 100%. A terceira é a carga rápida, realizada com corrente contínua, usada em postos de recarga públicos. Nesse último método de carga, em 30min a bateria se encontrará com 80% da capacidade.

O carro é equipado com sistema regenerativo de frenagem, provendo energia para carga da bateria, ampliando a autonomia do veículo.

As baterias de íon lítio estão sendo largamente utilizadas devido as suas características de densidade de energia, energia armazenada e sua eficiência de carga. São utilizadas em notebooks, celulares e, mais recentemente, para a propulsão de veículos elétricos. Lítio é o metal mais leve e possui o maior potencial eletroquímico, provendo a maior energia específica por peso, de forma que é a configuração de bateria com maior densidade de energia.

A capacidade de carga é influenciada por diversos fatores, como, por exemplo, a rotina de uso do veículo, a temperatura de operação da bateria e as condições de estacionamento do veículo (condições da bateria em repouso). Uma característica da bateria Li-íon é que suas reações internas não param de ocorrer, mesmo quando não está em uso, dessa forma a sua capacidade de armazenamento diminui constantemente a partir do momento que é fabricada. É esperado para o modelo de bateria utilizado no LEAF que a capacidade seja reduzida em 20% após 5 anos de uso.

A bateria principal do Nissan LEAF é a íon de lítio laminada, com catodos de manganato de lítio e anodos de carbono (grafite). A tensão nominal é de 360V e capacidade de 24kWh, podendo entregar uma potência superior a 90kW. No modelo disponível (2011/12) a autonomia certificada pela agência de proteção ambiental dos Estados Unidos (EPA ou USEPA) é de 117km. Pelos testes europeus realizados de acordo com o New European Drive Cycle (NEDC) a autonomia chega a 175km [44].

O modelo usado para os testes foi o de 2011/12. Durante o teste de descarga, cujos detalhes serão apresentados na seção seguinte, a autonomia máxima registrada foi de 109 km.

3.2.1 TESTE DE USO (DESCARGA)

Para estimar uma curva representativa da descarga da bateria foi realizado um teste dividido em três trechos com o Nissan LEAF. Durante os percursos foram anotados a hora, os quilômetros rodados e a autonomia do veículo de acordo com o display do carro. Os percursos e dados anotados são apresentados com maiores detalhes no Apêndice B.

No primeiro trecho o carro saiu da Ilha do Fundão completamente carregado (autonomia igual a 109 km), em direção à Lagoa Rodrigo de Freitas, onde há um posto de recarga rápida. Foram totalizados 13 km rodados em 43min. Ao fim, a autonomia era de 92 km.

A recarga foi realizada, após o mostrador indicava uma autonomia de 107 km. O segundo trecho foi do posto de recarga ao campus da UFRJ na Praia Vermelha, onde o carro ficou estacionado por 20 minutos. O percurso de 7 km teve duração de 35min, finalizando com uma autonomia de 82 km. Por fim, o carro foi levado de volta ao Fundão, começando com uma autonomia de 89 km, rodou os 26 km em 45min, chegando ao destino final com uma autonomia de 66 km.

Por essa experiência, percebe-se que a autonomia não está diretamente relacionada com os quilômetros rodados. Estabelecer uma equação representativa para a curva de descarga da bateria não é trivial. Além de ser imprevisível o uso dos sistemas auxiliares, i.e., farol, seta, ar condicionado, etc., o veículo possui diversos modos de direção que influenciam diretamente no consumo de energia (conforme apresentado na seção 2.1), além de ser equipado com frenagem regenerativa, aumentando a autonomia do veículo durante a atividade de direção.

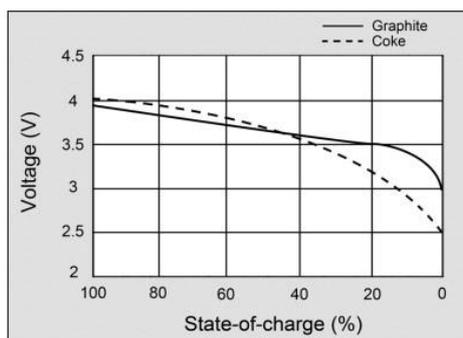
Quando em carga constante, as baterias Li-ion com anodo de grafite apresentam uma relação entre tensão e estado de carga (ou SoC, do inglês *State of Charge*) linear em grande parte da sua curva, conforme pode ser visto na Figura 3-6. Embora o uso do veículo seja longe de ser constante, é comum na literatura se referir à eficiência do veículo como uma taxa contínua expressa em km/kWh [2], portanto, assumiu-se uma modelagem de descarga linear como sendo suficiente para os propósitos do trabalho. Para descobrir o valor que melhor se adequa a realidade do Nissan LEAF disponível para testes, as seguintes equações foram usadas:

$$\varepsilon = \frac{a}{E} \quad (\text{Equação 3-1})$$

$$E_f = E_o - \frac{\Delta s}{\varepsilon} \quad (\text{Equação 3-2})$$

em que “ ε ” é a eficiência do veículo, em km/kWh; “ a ” é a autonomia expressa em km; “ E ”, a energia disponível na bateria, sendo “ E_f ” a energia final e “ E_o ” inicial; e “ Δs ” o deslocamento total do veículo em km.

Com base no teste realizado, chegou-se ao valor de 4,35 km/kWh para a eficiência dos veículos.



Fonte: http://batteryuniversity.com/learn/article/lithium_based_batteries

Figura 3-6: Curva padrão para um célula de bateria de íon de lítio

3.2.2 TESTE DE RECARGA

Para reconhecer o comportamento da recarga do veículo sua bateria foi levada ao ponto máximo de depleção, caracterizando um SoC igual a 0%. A curva de carga foi levantada utilizando o analisador de qualidade 8335 PowerPad da AEMC Instruments, utilizando um passo de amostragem de 1 minuto. O carro foi conectado a um circuito dedicado após o horário do expediente padrão do Centro de Tecnologia visando reduzir o impacto de outras atividades no levantamento da curva. A carga realizada foi do tipo *normal charge*, utilizando o carregador portátil do Nissan LEAF, conectado a uma tomada industrial de 16A.

Os parâmetros observados nesse teste foram os de potência, tensão e corrente, tanto RMS quanto a distorção harmônica (THD). O início e final da carga acontecem de forma suave, através de uma rampa de corrente. Após esse breve período os valores permanecem constantes, variando menos de 1%. O THD de corrente máximo detectado foi igual a 11,8%, estando abaixo do limite determinado pela norma IEC61000-3-2 para a corrente em questão.

Pela análise da Tabela 3-3, onde se tem um resumo do teste de recarga, em combinação com o gráfico de potências (Figura 3-7), conclui-se que a carga lenta apresenta um perfil praticamente constante de consumo com fator de potência muito próximo a unidade. Assim, pode-se considerar a recarga linear, portanto com potência constante, assumindo um valor igual à média de potência ativa durante o período de teste.

Tabela 3-3: Parâmetros do teste de recarga

TEMPO TOTAL DE CARGA	POTÊNCIA MÉDIA (VA)	POTÊNCIA ATIVA MÉDIA (W)	POTÊNCIA REATIVA MÉDIA (VAr)	FATOR DE POTÊNCIA
05:32:00	3592,745	3554,025	525,995	0,989

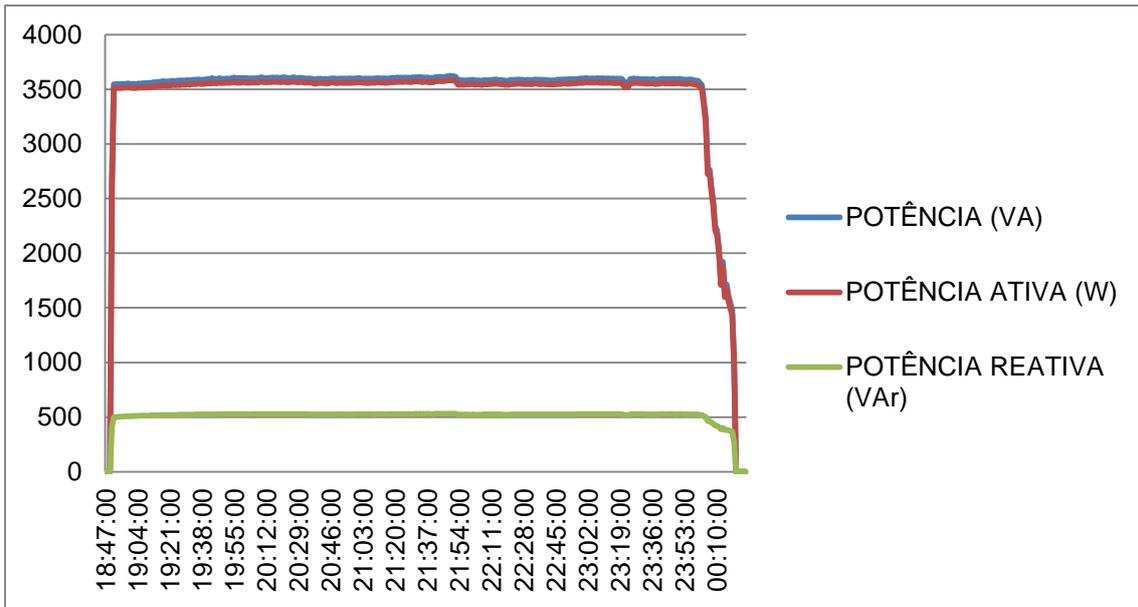


Figura 3-7: Comportamento da curva de carga

3.3 PREMISSAS

Será considerado que todos os veículos são do tipo BEV, seguindo o mesmo modelo de bateria utilizado no Nissan LEAF (24kWh). Eles estão plenamente carregados ao saírem do ponto de partida, apresentando uma eficiência igual a 4,35km/KWh. Todos dão entrada no Centro de Tecnologia às 8h e se conectam à rede nesse momento.

O CT funcionaria como um agregador, apresentado na seção 2.4 e ilustrado na Figura 2-11, porém a energia dos VEs não seria utilizada para venda a concessionária, assemelhando-se mais ao conceito de *Vehicle-to-Home* que ao *Vehicle-to-Grid* em si. Como se considerou a existência de comunicação entre rede elétrica e carregadores, a recarga será apresentada como carga controlada, portanto os veículos passam a recarregar dado um sinal da rede, e não necessariamente no momento de conexão.

Todos os parâmetros utilizados para os cálculos são apresentados nas tabelas a seguir. Uma associação interessante que pode ser feita através da análise da Tabela 3-6 é a relação entre a quantidade de veículos esperada pela distância percorrida. A maior quantidade de veículos percorre distâncias menores, assim, menos de 2% dos veículos demorariam mais de 2 horas para recarregar completamente.

A potência de transferência do V2G é limitada em três fatores [3]:

- i. Capacidade dos condutores da instalação;
- ii. A energia armazenada no veículo e o tempo que será usada;
- iii. A máxima potência que a eletrônica embarcada do VE pode fornecer.

Nesse trabalho serão analisados o segundo e terceiro fator. Não foram consideradas as perdas de conversão e na instalação.

Tabela 3-4: Demanda contratada por mês

MÊS	DEMANDA CONTRATADA (kVA)
Janeiro	4.700,00
Fevereiro	4.700,00
Março	4.700,00
Abril	4.700,00
Mai	4.100,00
Junho	4.750,00
Julho	4.750,00
Agosto	4.750,00
Setembro	4.750,00
Outubro	4.750,00
Novembro	4.750,00
Dezembro	5.050,00

Tabela 3-5: Premissas assumidas para os cálculos nas operações de V2G e G2V

PARÂMETROS	
Desempenho energético (km/kWh)	4,35
Energia da bateria (kWh)	24
Potência média de recarga (kW)	3,554
Taxa de recarga G2V (kWh/h)	4,174
Taxa de recarga G2V (kWh/15min)	1,043
Eficiência de conversão V2G	100%
Quantidade total de veículos	300
Índice de penetração	21%

Tabela 3-6: Valores assumidos para distância percorrida

ZONA ADMINISTRATIVA	DISTÂNCIA MÉDIA DA ILHA DO FUNDÃO (km)	TEMPO MÉDIO (min)	VELOCIDADE MÉDIA (km/h)	QUANTIDADE MÁXIMA DE VEÍCULOS ESPERADA ($\gamma=100\%$)
Baixada - Duque de Caxias	13,1	32	24,56	41
Baixada - Leste	28,2	46	36,78	42
Baixada - Oeste	27,4	45	36,53	24
Baixada - Xerém	40,5	56	43,39	0
Bangu	30,5	47	38,94	35
Barra da Tijuca	28,7	35	49,20	106
Botafogo	16,4	22	44,73	335
Campo Grande	42,9	63	40,86	22
Centro	11,4	16	42,75	61
Ilha do Governador	10,3	17	36,35	149
Inhauma	7,5	12	37,50	13
Irajá	14,5	27	32,22	0
Jacarepaguá	26,3	34	46,41	87
Madureira	16,1	24	40,25	55
Méier	11,2	18	37,33	88
Niterói	20,5	25	49,20	125
Pavuna	19,3	30	38,60	20
Penha	6,4	15	25,60	24
Ramos	4,4	11	24,00	33
Santa Cruz	56,0	70	48,00	4
São Cristóvão	6,0	6	60,00	0
Tijuca	12,9	25	30,96	191
Vigário Geral	16,8	35	28,80	0

4 ANÁLISE DE CENÁRIOS

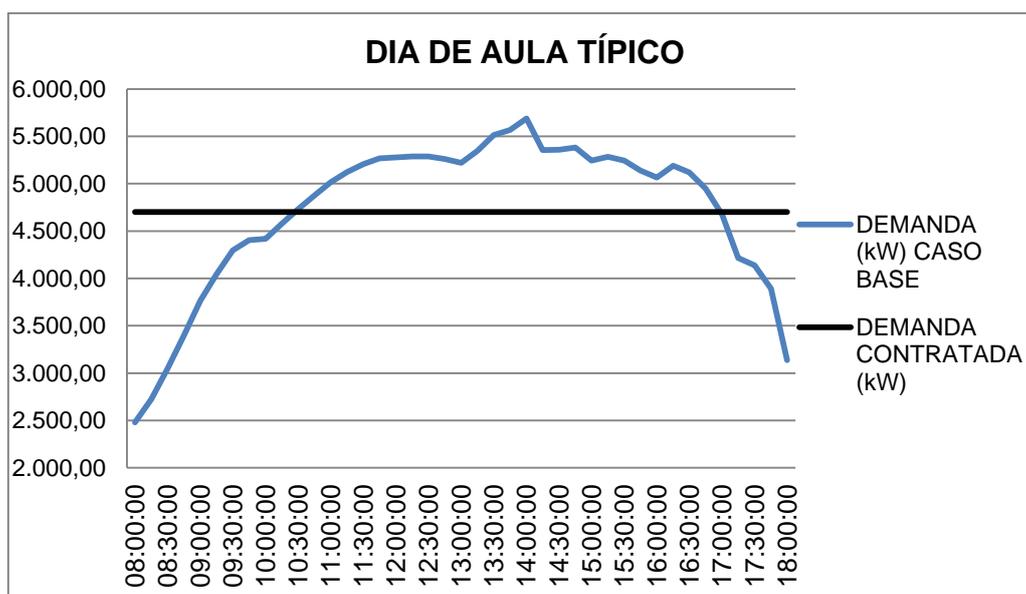


Figura 4-1: Dia de aula típico considerado para as primeiras análises

Tabela 4-1: Condição dos VE ao chegar no Fundão

ZONA ADMINISTRATIVA	DISTÂNCIA MÉDIA DA ILHA DO FUNDÃO (km)	VEÍCULOS TOTAIS	ENERGIA (kWh) / VEÍCULO	%BATERIA
Baixada - Duque de Caxias	13,1	8	20,99	87,45%
Baixada - Leste	28,2	9	17,52	72,99%
Baixada - Oeste	27,4	5	17,70	73,75%
Baixada - Xerém	40,5	0	14,69	61,21%
Bangu	30,5	7	16,99	70,79%
Barra da Tijuca	28,7	22	17,40	72,51%
Botafogo	16,4	68	20,23	84,29%
Campo Grande	42,9	5	14,14	58,91%
Centro	11,4	13	21,38	89,08%
Ilha do Governador	10,3	31	21,63	90,13%
Inhauma	7,5	3	22,28	92,82%
Irajá	14,5	0	20,67	86,11%
Jacarepaguá	26,3	18	17,95	74,81%
Madureira	16,1	11	20,30	84,58%
Méier	11,2	18	21,43	89,27%
Niterói	20,5	26	19,29	80,36%
Pavuna	19,3	4	19,56	81,51%
Penha	6,4	5	22,53	93,87%
Ramos	4,4	7	22,99	95,79%
Santa Cruz	56	1	11,13	46,36%
São Cristóvão	6	0	22,62	94,25%
Tijuca	12,9	39	21,03	87,64%
Vigário Geral	16,8	0	20,14	83,91%

Diversos cenários foram propostos variando o índice de penetração dos veículos e a forma de operação do *Vehicle-to-Grid*. As análises foram realizadas em primeira instância de acordo com um dia típico de aula⁷ em Março (Figura 4-1), mês que apresentou maior demanda medida. Todas as curvas de carga para cada mês estão dispostas no Apêndice A.

O estado de carga das baterias de cada grupo de veículos, calculado de acordo com a distância média até a ilha do Fundão e a eficiência do veículo, é apresentado na Tabela 4-1.

4.1 CENÁRIO 1

A primeira hipótese a ser analisada considera um estacionamento dedicado aos veículos elétricos e potência de transferência de V2G igual a 6kW, compatível com o que vem sendo praticado nos sistemas de *Vehicle-to-Home*. A parte dedicada aos VEs seria o estacionamento atrás do bloco A, próximo à entrada de alimentação da concessionária, totalizando 300 vagas ($\gamma \approx 21\%$).

Nesse modelo, em 4 horas os veículos estariam completamente descarregados, podendo entregar 1,8 MW a rede do CT, muito mais que o necessário. A fim de reduzir os picos, 4 horas de operação faz-se necessário, portanto os VEs foram organizados para desempenharem o *Vehicle-to-Grid* em grupos iguais por hora (75 veículos/hora). Escolheu-se a janela de 11h às 15h para essa atividade, horários de maior demanda.

Antes das 11h os VEs estariam carregando, sendo 3h tempo suficiente para todos chegarem à carga máxima. Após às 15h os automóveis poderiam voltar a recarregar. Nesse momento, todos os veículos se encontrariam com um estado de carga igual a 75%, necessitando de 1 hora e 30 minutos para recarga completa. Como às 15h a demanda ainda é elevada, essa carga foi distribuída, sendo 25% das 15h às 16h30 e 75% das 16h30 às 18h. A Figura 4-2 mostra a quantidade de veículos carregando (G2V, em vermelho) e descarregando (V2G, em verde).

Os resultados para essas condições são mostrados no gráfico da Figura 4-3.

Para saber os benefícios para a instalação foi calculada a energia consumida entre às 8h e 18h no caso base, quando ocorre somente a carga dos veículos e quando o V2G é utilizado, além da identificação do pico de demanda. Pela análise da tabela de resultados (Tabela 4-1), percebe-se que, nesse cenário, a aplicação do V2G reduz a potência demandada e também o consumo de energia.

⁷ Para determinar as demandas de um dia típico de aula, excluiu-se os finais de semana, feriados e os dias de férias, e se calculou a média por horário dos dias remanescentes.

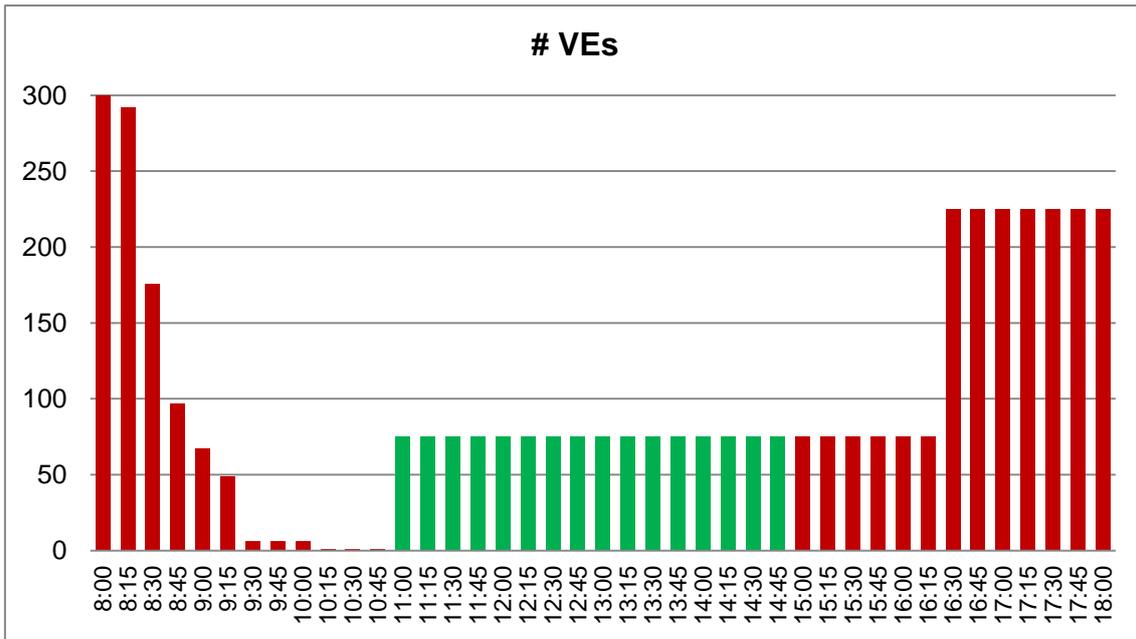


Figura 4-2: Histograma da quantidade de VEs operando em cada horário para o "Cenário 1"

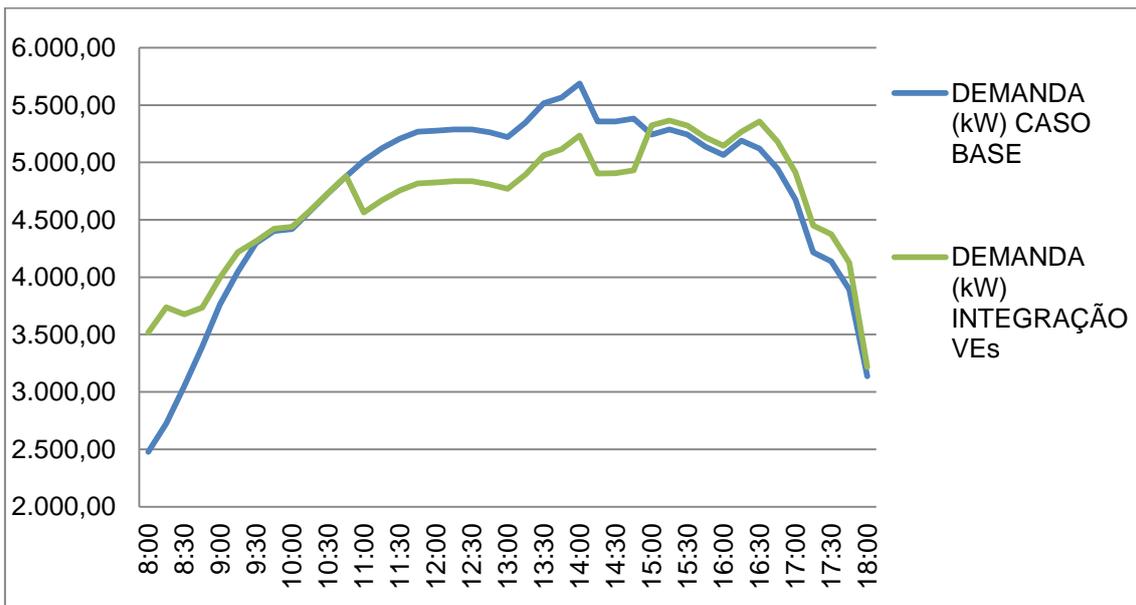


Figura 4-3: Resultado da curva de demanda para o "Cenário 1"

Tabela 4-1: Resultados de energia e demanda "Cenário 1"

	CASO BASE	CASO G2V	CASO V2G	% V2G-BASE
ENERGIA (kWh)	47.601,91	48.344,83	47.019,77	1,22%
DEMANDA MÁXIMA (kW)	5.687,28	5.687,28	5.364,58	5,67%

4.2 CENÁRIO 2

Utilizando as mesmas condições de estacionamento do cenário anterior, procurou-se definir outro valor para a potência de trabalho do V2G.

Os fatores limitantes para essa determinação são o tempo de operação, tanto no sentido V2G quanto G2V, e a mínima energia final que a bateria pode chegar a fim de ter tempo de carregar até o final do expediente. Os seguintes cálculos foram realizados:

$$P_{V2G} = \frac{E_0 - E_f}{t_{V2G}} \quad (\text{Equação 4-1})$$

$$E_f = E_0 - P_{G2V}t_{G2V} \quad (\text{Equação 4-2})$$

$$E_f = 24 - 3,55 \times 3 = 13,34 \text{ kWh}$$

$$P_{V2G} = \frac{24 - 13,34}{4} = 2,67 \text{ kW}$$

Dessa forma, a potência disponível no estacionamento é superior a 800 kW, um valor ideal para reduzir a potência medida a um valor inferior ao da demanda contratada no período de despacho. Contudo, a utilização desse valor aumentaria muito a demanda às 15h, hora da segunda recarga dos veículos, momento em que a demanda do caso base ainda é elevada. Uma solução testada foi a divisão dos veículos em dois grupos para carga e descarga, ilustrado na Figura 4-4. Os resultados são mostrados a seguir nas Figura 4-5 e Tabela 4-2.

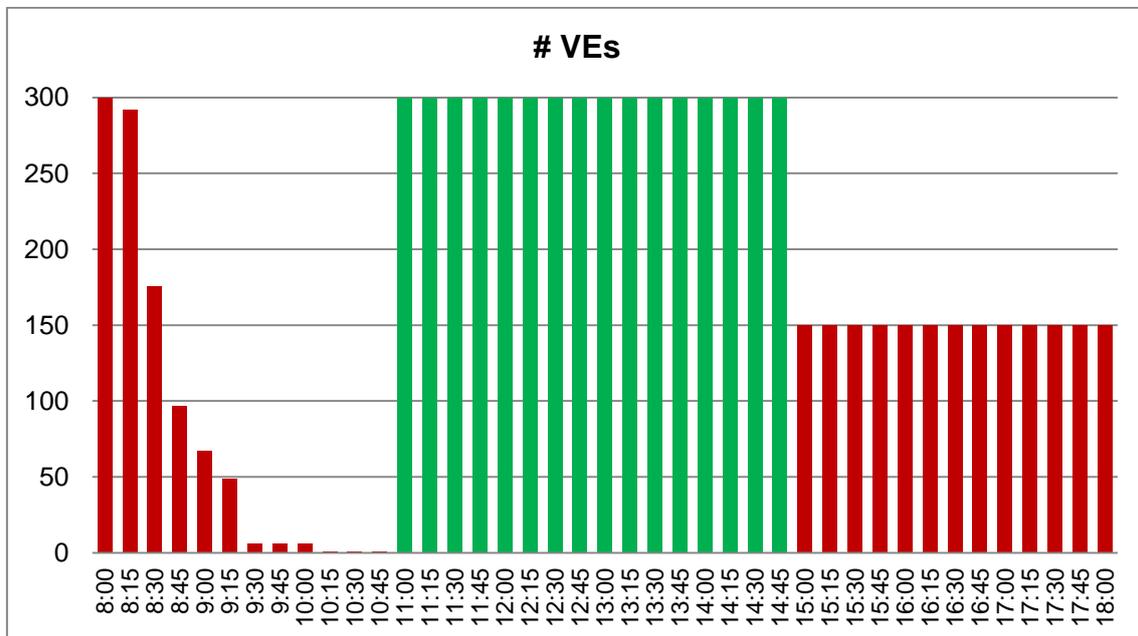


Figura 4-4: Histograma da quantidade de VEs operando em cada horário para o "Cenário 2-1"

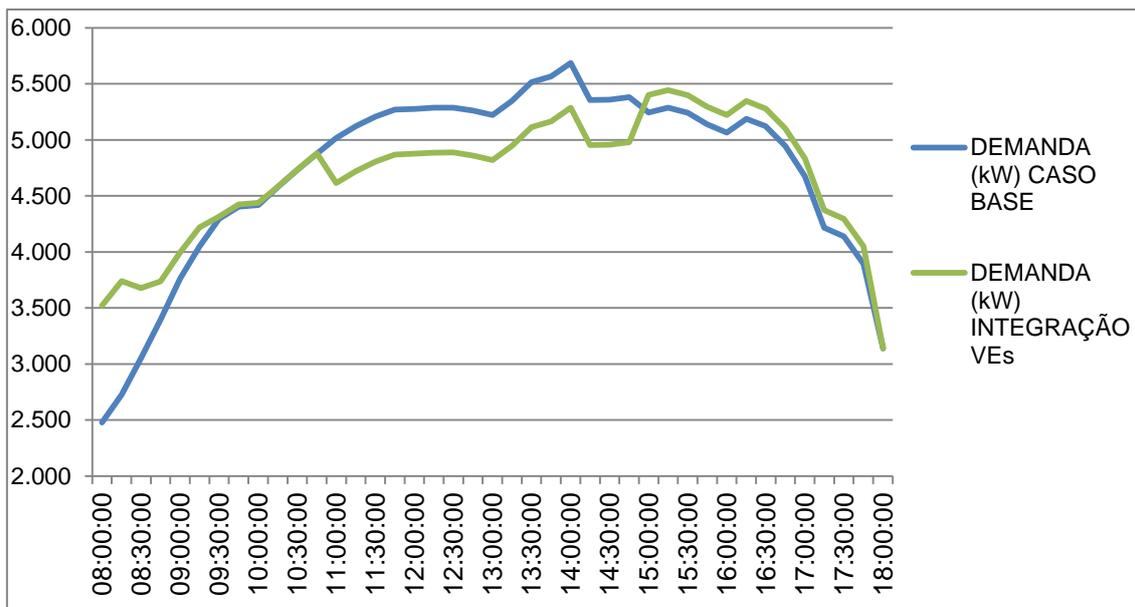


Figura 4-5: Resultado da curva de demanda para o "Cenário 2-1"

Tabela 4-2: Resultados de energia e demanda "Cenário 2-1"

	CASO BASE	CASO G2V	CASO V2G	% V2G-BASE
ENERGIA (kWh)	47.601,91	48.344,83	47.054,27	1,15%
DEMANDA MÁXIMA (kW)	5.687,28	5.687,28	5.443,10	4,29%

Outra opção para definir a potência transferida é reduzir o segundo tempo de recarga para uma hora após às 17h em uma potência inferior a do carregador, conforme sugerido em [2], assim P_{V2G} seria menor (0,4 kW), possibilitando todos os veículos operarem juntos. A segunda recarga foi realizada a uma potência igual a 1,5 kW.

O impacto dessa alternativa não é muito diferente do anterior, no entanto esse método provavelmente apresenta maior simplicidade para implementação. Devido a potência de Vehicle-to-Grid ser muito baixa, mesmo com todos os veículos operando junto, não é possível diminuir a demanda máxima para atender o objetivo de reduzir o valor abaixo do alimentador reserva (5,3 MW). Os resultados são mostrados a seguir.

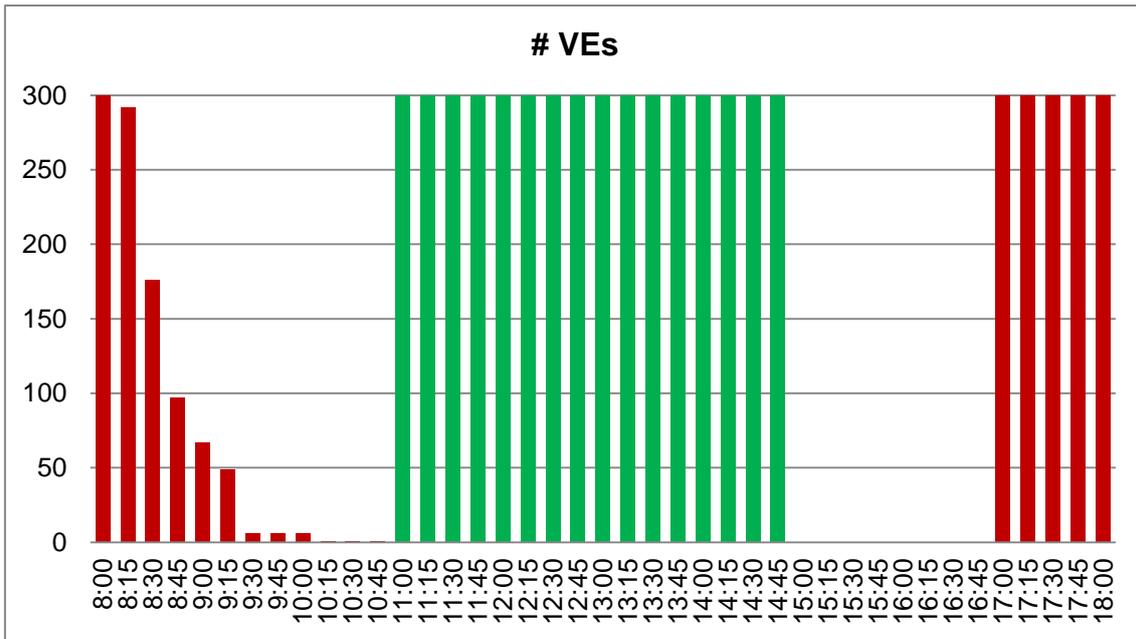


Figura 4-6: Histograma da quantidade de VEs operando em cada horário para o "Cenário 2-2"

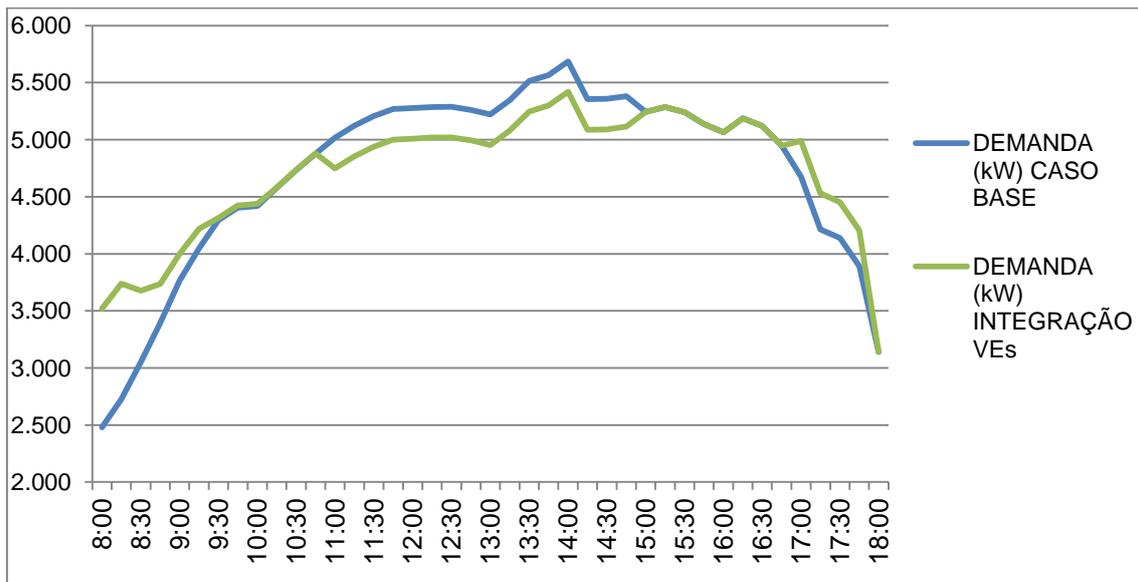


Figura 4-7: Resultado da curva de demanda para o "Cenário 2-2"

Tabela 4-3: Resultados de energia e demanda "Cenário 2-2"

	CASO BASE	CASO G2V	CASO V2G	% V2G-BASE
ENERGIA (kWh)	47.601,91	48.344,83	47.589,15	0,03%
DEMANDA MÁXIMA (kW)	5.687,28	5.687,28	5.419,84	4,70%

4.3 CENÁRIO 3

A proposta desse cenário é realizar um corte nos picos de demanda, fazendo a curva de carga ficar plana nos horários de pico. Para facilitar o controle da carga final de cada veículo, todos eles estarão descarregando na mesma potência pelo mesmo intervalo de tempo. Escolheu-se os valores de 6 kW e 15 minutos para esses parâmetros, de forma a possibilitar também uma recarga controlada, evitando os picos após às 15h.

Para a definição da potência limite foram realizadas algumas tentativas de forma a adequar o número total de veículos que desempenharam o V2G ao total estacionado. Assim, chegou-se ao valor de 5250 kW. Com essa limitação, a transferência de potência passou a ser necessária somente às 12h, portanto a operação pode ser estendida até às 15h30.

A quantidade de veículos fornecendo energia para cada período de medição foi definida de acordo com a Equação 4-3.

$$N = \frac{(P_{CB} - P_{lim})}{P_{V2G}} \quad (\text{Equação 4-3})$$

O mesmo princípio foi aplicado para calcular a quantidade de veículos que poderia ser recarregada após às 15h30. Como a recarga ocorre em uma potência inferior, cada veículo precisa de cerca de 30 minutos para atingir um SoC igual a 100%.

Os resultados são mostrados a seguir. Na Tabela 4-5 e na Figura 4-8 é possível visualizar a quantidade de veículos conectados à rede. A indicação em cores mostra o fluxo de potência. Em verde, a potência está sendo fornecida pelo veículo (V2G) e em vermelho, a potência flui da rede para o veículo (G2V).

Limitar a demanda garante a maior redução na potência medida, porém apresenta um aumento na energia consumida. Nesse caso, somente 275 veículos foram acionados para fornecer potência à rede, com isso, se ganha flexibilidade no sistema V2G, podendo atender a exceções, como, por exemplo, a saída mais cedo de algum VE.

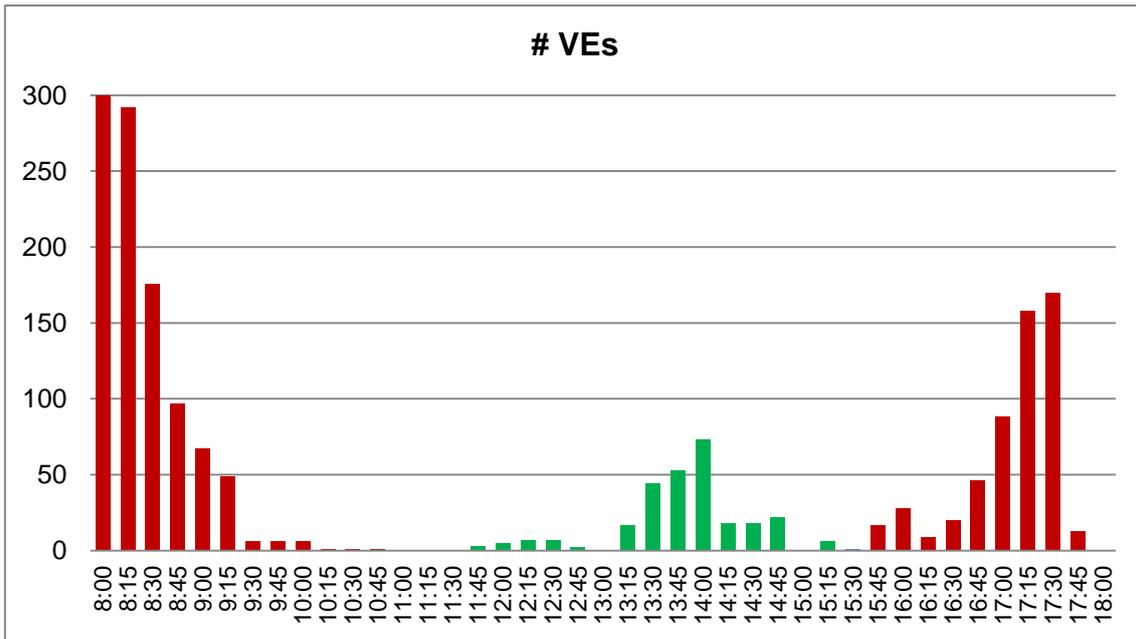


Figura 4-8: Histograma da quantidade de VEs operando em cada horário para o "Cenário 3"

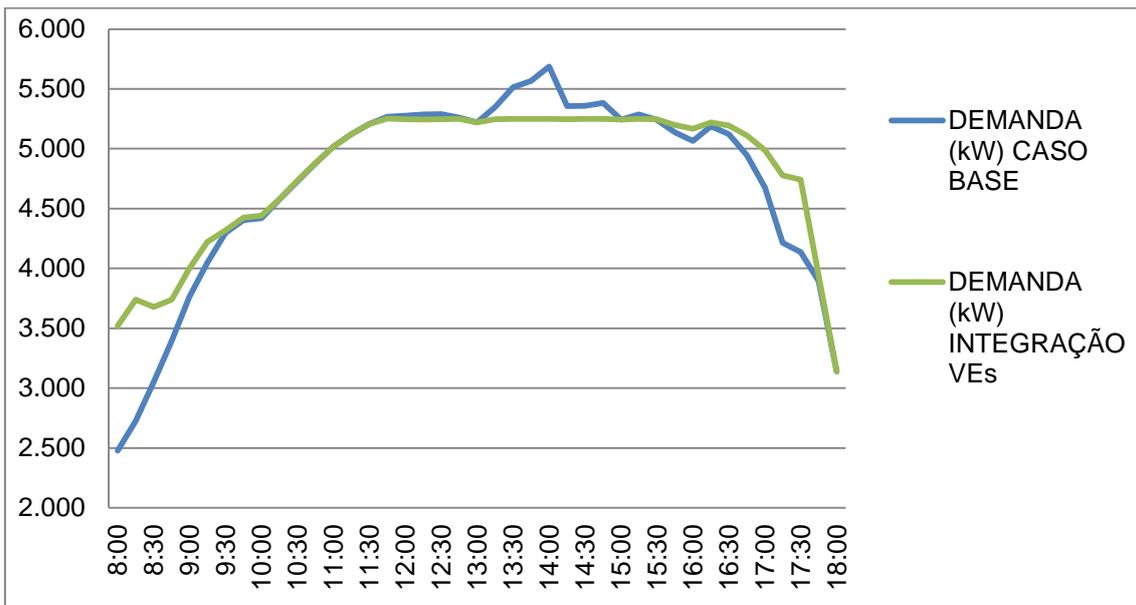


Figura 4-9: Resultado da curva de demanda para o "Cenário 3"

Tabela 4-4: Resultados de energia e demanda "Cenário 3"

	CASO BASE	CASO G2V	CASO V2G	% V2G-BASE
ENERGIA (kWh)	47.601,91	48.349,59	48.425,77	-1,73%
DEMANDA MÁXIMA (kW)	5.687,28	5.687,28	5.250,78	7,68%

Tabela 4-5: Relação da quantidade de veículos carregando/descarregando no "Cenário3"

HORA	DEMANDA (kW) CASO BASE	DEMANDA (kW) INTEGRAÇÃO VEs	# VEs
08:00:00	2478,6	3519,93	300
08:15:00	2725,38	3738,28	292
08:30:00	3051,54	3677,05	176
08:45:00	3395,52	3740,26	97
09:00:00	3762,72	4000,84	67
09:15:00	4048,92	4223,07	49
09:30:00	4295,7	4317,02	6
09:45:00	4403,7	4425,02	6
10:00:00	4419,36	4440,68	6
10:15:00	4576,5	4580,05	1
10:30:00	4730,4	4733,95	1
10:45:00	4877,28	4880,83	1
11:00:00	5016,06	5016,06	0
11:15:00	5122,44	5122,44	0
11:30:00	5206,14	5206,14	0
11:45:00	5268,78	5250,78	3
12:00:00	5276,88	5252,88	5
12:15:00	5287,14	5251,14	7
12:30:00	5288,22	5252,22	7
12:45:00	5261,22	5249,22	2
13:00:00	5220,72	5220,72	0
13:15:00	5347,62	5251,62	17
13:30:00	5514,48	5250,48	44
13:45:00	5566,86	5248,86	53
14:00:00	5687,28	5249,28	73
14:15:00	5355,72	5247,72	18
14:30:00	5357,34	5249,34	18
14:45:00	5381,64	5249,64	22
15:00:00	5243,94	5243,94	0
15:15:00	5286,06	5250,06	6
15:30:00	5242,32	5245,87	1
15:45:00	5138,1	5198,52	17
16:00:00	5065,74	5165,25	28
16:15:00	5188,86	5220,85	9
16:30:00	5120,82	5188,35	20
16:45:00	4945,86	5109,35	46
17:00:00	4675,86	4981,51	88
17:15:00	4215,24	4769,67	158
17:30:00	4138,02	4731,54	170
17:45:00	3892,86	3939,06	13
18:00:00	3138,19	3138,19	0

4.4 SUGESTÕES PARA IMPLANTAÇÃO

Não há muitas informações sobre a possível operação dos dispositivos que realizam V2G. Assumindo que sejam apenas inversores trifásicos, uma lógica deve ser elaborada para atender os cenários aqui propostos.

Uma proposta é a utilização de interruptores programáveis para controle do conversor. O interruptor horário programável (IHP) permite o controle da abertura e fechamento de contatos de acordo com um programa definido pelo usuário, que deve ser reprogramado diária ou semanalmente. A programação e interface dos IHPs são amigáveis, sendo facilmente possível configurar para ligar nos horários estabelecidos em cada cenário apresentado.

No “Cenário 3” é necessário saber a demanda em tempo real, de forma que o acionamento do IHP ocorresse somente quando a potência demandada fosse superior ao limite estabelecido. Um projeto para levantamento dos requisitos funcionais e técnicos para a implementação da telemedição nas 23 subestações do Centro de Tecnologia já foi realizado pelo Fundo Verde [45], sendo considerado o passo inicial para a instalação dos *smart meters*, necessários para o funcionamento desse terceiro cenário proposto.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A inserção dos veículos elétricos pode ser uma boa aliada à redução de poluição local. Nos dois anos do programa de táxi elétrico da Nissan no Rio de Janeiro foi evitada a emissão de 270 toneladas de CO₂ [1]. Além da vantagem ambiental, os taxistas mencionam o conforto na direção, principalmente pelo motor silencioso, e uma economia estimada em R\$10 mil por ano, devido à baixa manutenção necessária nos VEs e ao preço da energia elétrica ser bem inferior ao do combustível.

Estima-se para 2015 a venda de 500 mil VEs [10], totalizando uma frota superior a 1 milhão no mundo, portanto os estudos do impacto na rede tornam-se cada vez mais importantes. Nesse trabalho, avaliou-se um passo além da penetração dos veículos elétricos, a utilização do Vehicle-to-Grid.

Embora os estudos de V2G apontem que o tipo de energia produzida por esse sistema não consiga prestar serviços de fornecimento de energia elétrica à rede a um preço competitivo [41], os resultados aqui levantados foram interessantes no âmbito de instalação. Nos cenários analisados, variando entre forma de controle e potência de transferência, os resultados foram positivos para a redução do pico de demanda. Com a aplicação do conceito seria possível reduzir a potência de forma a evitar cortes por ultrapassagem do limite do alimentador. Não obstante, a ação não deve ser isolada, pois mesmo com o decréscimo na curva, não é possível equiparar a carga com a demanda contratada.

A busca pela redução nas contas de luz e por um Centro de Tecnologia mais sustentável deve combinar diversas ações. Os programas de conscientização e a construção do estacionamento solar são exemplos de projetos que já estão em estado de execução. Outra sugestão é a renegociação da demanda contratada, o que necessitaria de uma análise um pouco mais aprofundada do consumo. Uma ferramenta já existente para o controle é a FEGELC (Ferramenta de Gerenciamento de Energia Elétrica Controlada) [46],[47], onde o próprio sistema é capaz de calcular uma demanda ótima.

5.1 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

O presente trabalho é um projeto básico, que utiliza premissas gerais para simulação da aplicação de um conceito novo na engenharia elétrica. Diversos temas podem ser retirados do refinamento dele. Algumas propostas são:

- i. *Diversificação dos VEs do estacionamento* – o presente projeto foi baseado em apenas um modelo de carro BEV. Seria interessante analisar o impacto com diferentes índices de penetração combinando também os PHEVs, que possuem baterias menores.

- ii. *Avaliação socioeconômica* – em [48] foi realizado um estudo socioeconômico para prever quais eram os bairros que tinham mais tendência a adquirir VEs devido às condições econômicas dos residentes. Esse estudo aprimoraria o entendimento da recarga inicial, podendo alterar os horários de utilização do V2G.
- iii. *Estudo do impacto na conta de luz* – utilizar os cenários aqui propostos para simular a alteração nos valores da conta de luz do CT.
- iv. *Cálculo das perdas do sistema* – baseado em perdas de conversores e da condução de energia elétrica, calcular a eficiência do sistema V2G e o impacto que isso traria aos dados aqui apresentados.
- v. *Simulação com taxa de amostragem mais compatível com a curva de carga da bateria* – com a troca dos medidores para *smart meters*, será possível um acompanhamento da curva de carga em espaços de um minuto (ou até mesmo em tempo real), dessa forma a simulação pode ser aprimorada para uma taxa de amostragem menor, sendo mais fiel ao perfil de carga das baterias.

6 REFERÊNCIAS

- [1] Ministério de Minas e Energia – MME, 2015. Resenha Energética Brasileira. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/documents/1138787/1732840/Resenha+Ener%C3%A9tica+-+Brasil+2015.pdf/4e6b9a34-6b2e-48fa-9ef8-dc7008470bf2>. Acesso em 18 de agosto de 2015.
- [2] BORBA, Bruno Soares Moreira Cesar. **Modelagem Integrada da Introdução de Veículos Leves Conectáveis à Rede Elétrica no Sistema Energético Brasileiro**. 2012. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- [3] KEMPTON, Willett; TOMIĆ, Jasna. **Vehicle-to-grid power fundamentals: Calculating capacity and net revenue**. Journal of power sources, v. 144, n. 1, p. 268-279, 2005.
- [4] LEITMAN, Seth; BRANT, Bob. **Build your own electric vehicle**. 2nd edition, McGraw-Hill, Inc., 2009.
- [5] HADLEY, Stanton W.; TSVETKOVA, Alexandra A. **Potential impacts of plug-in hybrid electric vehicles on regional power generation**. The Electricity Journal, v. 22, n. 10, p. 56-68, 2009.
- [6] CLEMENT-NYNS, Kristien; VAN REUSEL, Koenraad; DRIESEN, Johan. **The consumption of electrical energy of plug-in hybrid electric vehicles in Belgium**. In: Proceedings of EET-European Ele-Drive Transportation conference. 2007. p. 10.
- [7] Notícias Automotivas, 2015. Disponível em: <http://www.noticiasautomotivas.com.br/hibridos-representam-menos-de-5-do-mercado-mundial/>. Acesso em 26 de abril de 2015.
- [8] Veículo Elétrico, 2015. Disponível em: <http://www.veiculoeltrico.blog.br/2015/02/eletricos-mais-pontos-de-recarga-do-que.html>. Acesso em 26 de abril de 2015.
- [9] O Globo, 2015. Disponível em: <http://oglobo.globo.com/economia/carros/taxis-eletricos-do-rio-completam-dois-anos-na-praca-sem-dar-defeitos-15999956>. Acesso em 15 de Agosto de 2015.
- [10] Automotive Business, 2015. Disponível em: <http://www.automotivebusiness.com.br/noticia/21437/em-2015-espera-se-a-venda-de-500-mil-veiculos-eletricos-no-mundo>. Acesso em 26 de abril de 2015.
- [11] IEA, 2007. International Energy Agency, Status Overview of Hybrid and Electric Vehicle Technology. Paris, France.
- [12] IEA, 2009. International Energy Agency, Status Overview of Hybrid and Electric Vehicle Technology. Paris, France.

- [13] BRADLEY, Thomas H.; FRANK, Andrew A. **Design, demonstrations and sustainability impact assessments for plug-in hybrid electric vehicles**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 13, n. 1, p. 115-128, 2009.
- [14] Wikipedia, Range anxiety. Disponível em: https://en.wikipedia.org/wiki/Range_anxiety. Acesso em 18 de Agosto de 2015.
- [15] SAN ROMÁN, Tomás Gómez et al. **Regulatory framework and business models for charging plug-in electric vehicles: Infrastructure, agents, and commercial relationships**. Energy policy, v. 39, n. 10, p. 6360-6375, 2011.
- [16] SAE Articles, 2010. Disponível em: <http://articles.sae.org/7479/>. Acesso em 10 de Maio de 2015.
- [17] IEC Newslog, 2014. Disponível em: <http://www.iec.ch/newslog/2014/nr1014.htm>. Acesso em 10 de Maio de 2015.
- [18] GÓMEZ, J. Carlos; MORCOS, Medhat M. **Impact of EV battery chargers on the power quality of distribution systems**. Power Delivery, IEEE Transactions on, v. 18, n. 3, p. 975-981, 2003.
- [19] Agência CNT de Notícias, 2012. Disponível em: http://www.cnt.org.br/Paginas/Agencia_Noticia.aspx?n=8514. Acesso em 09 de junho de 2015.
- [20] Departamento Nacional e Trânsito – DENATRAN, Frota Nacional de Abril de 2015 (2015). Disponível em: <http://www.denatran.gov.br/frota2015.htm>. Acesso em 11 de junho de 2015.
- [21] Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, Banco de Informações de Geração (2015). Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>. Acesso em 11 de junho de 2015.
- [22] Empresa de Pesquisa Energética – EPE, Anuário Estatístico de Energia Elétrica (2013). Resumo disponível em: <http://www.epe.gov.br/Estudos/Paginas/Anuário%20Estatístico%20de%20Energia%20Elétrica/EPEpublicaaedição2013doAnuárioEstatísticodeEnergiaElétrica.aspx?CategoriaID=363>. Acesso em 30 de Maio 2015.
- [23] CHAdeMO Association Website. Disponível em: <http://www.chademo.com/wp/>. Acesso em 27 de Julho de 2015.
- [24] LACOMMARE, Kristina Hamachi; ETO, Joseph H. **Cost of power interruptions to electricity consumers in the United States (US)**. Energy, v. 31, n. 12, p. 1845-1855, 2006.

- [25] JENKINS, Steven D.; ROSSMAIER, John R.; FERDOWSI, Mehdi. **Utilization and effect of plug-in hybrid electric vehicles in the United States power grid**. In: Vehicle Power and Propulsion Conference, 2008. VPPC'08. IEEE. IEEE, 2008. p. 1-5.
- [26] QUINN, Casey; ZIMMERLE, Daniel; BRADLEY, Thomas H. **The effect of communication architecture on the availability, reliability, and economics of plug-in hybrid electric vehicle-to-grid ancillary services**. Journal of Power Sources, v. 195, n. 5, p. 1500-1509, 2010.
- [27] TSENG, Huei-Ru. **A secure and privacy-preserving communication protocol for V2G networks**. In: Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), 2012 IEEE. IEEE, 2012. p. 2706-2711.
- [28] YANG, Zhenyu et al. : **Privacy-preserving communication and precise reward architecture for V2G networks in smart grid**. Smart Grid, IEEE Transactions on, v. 2, n. 4, p. 697-706, 2011.
- [29] TOMIĆ, Jasna; KEMPTON, Willett. **Using fleets of electric-drive vehicles for grid support**. Journal of Power Sources, v. 168, n. 2, p. 459-468, 2007.
- [30] KEMPTON, Willett; TOMIĆ, Jasna. **Vehicle-to-grid power implementation: From stabilizing the grid to supporting large-scale renewable energy**. Journal of Power Sources, v. 144, n. 1, p. 280-294, 2005.
- [31] HAINES, Gareth et al. **The simulation of vehicle-to-home systems—using electric vehicle battery storage to smooth domestic electricity demand**. EVER Monaco, 2009.
- [32] Nissan Motor Corporation, EVs as power sources for living. http://www.nissan-global.com/EN/TECHNOLOGY/OVERVIEW/vehicle_to_home.html. Acesso em 07 de Junho de 2015.
- [33] CHAVES, Francisco David Moya. **Serviços ancilares através da geração distribuída: reserva de potência ativa e suporte de reativos**. 2009. Tese de doutorado. Universidade Estadual de Campinas.
- [34] FINK, Lester H. **New control paradigms for deregulation**. In: Power Systems Restructuring. Springer US, 1998. p. 405-449
- [35] ONS, 2009. Operador Nacional do Sistema, Procedimentos de Rede. Disponível em: <http://www.ons.org.br/procedimentos/>. Acesso em: Abril de 2015.
- [36] SILVA, Fabio Stacke. **Modelo de formação de preços para mercados integrados de curto prazo/bilateral/renovável/ancilar de energia elétrica utilizando a metodologia preço por oferta**. 2009.

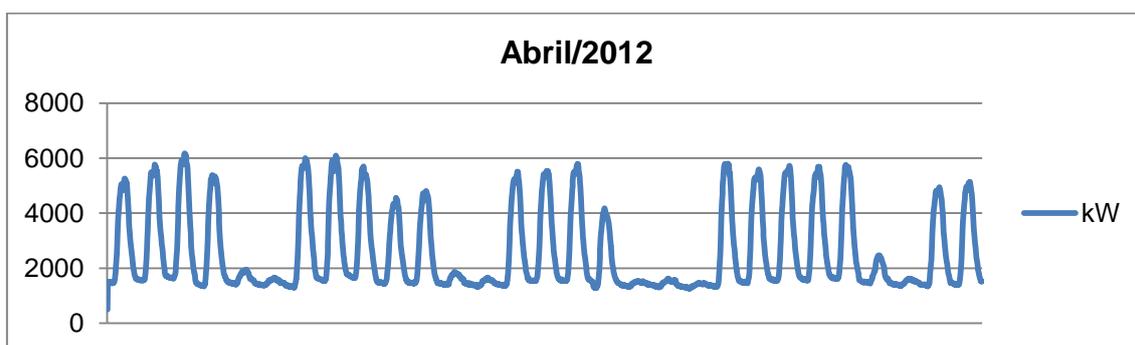
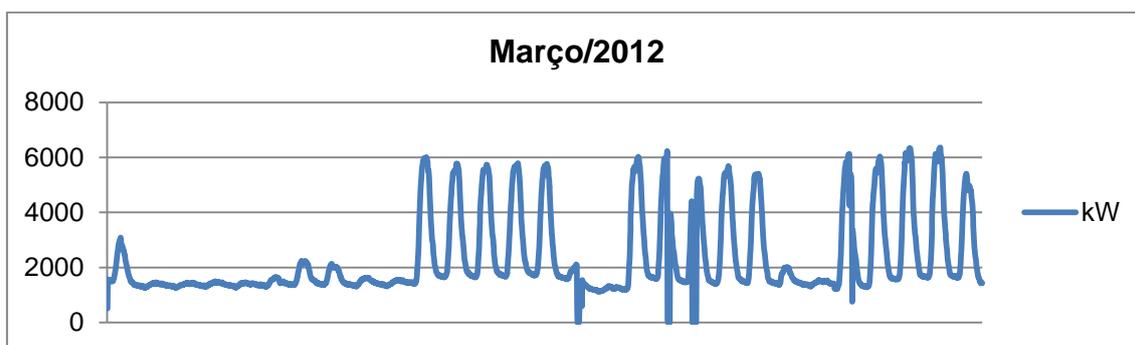
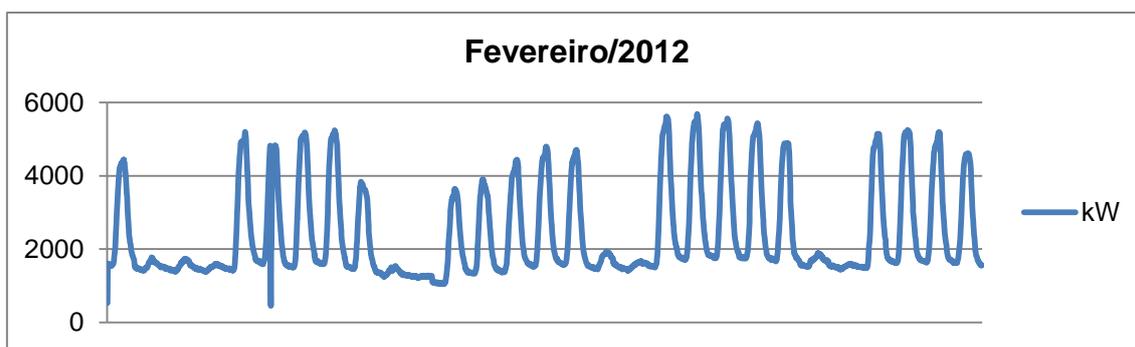
- [37] ANEEL, 2003. Agência Nacional de Energia Elétrica, Resolução ANEEL N°265.
- [38] COSTA, Andrea Lucia et al. **Alocação ótima conjunta de energia e reservas operativas baseada em fluxo de potência ótimo dinâmico**. 2004. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa Catarina.
- [39] BOLLEN, Math HJ. **Understanding power quality problems**. New York: IEEE press, 2000.
- [40] Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, Procedimentos de Distribuição (PRODIST), 2015. Disponível em: http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/M%C3%B3dulo8_Revis%C3%A3o_6_Retifica%C3%A7%C3%A3o_1.pdf. Acesso em 18 de Agosto de 2015.
- [41] CLEMENT-NYNS, Kristien; HAESSEN, Edwin; DRIESEN, Johan. **The impact of vehicle-to-grid on the distribution grid**. Electric Power Systems Research, v. 81, n. 1, p. 185-192, 2011.
- [42] Manual de Tarifação de Energia Elétrica. Procel. Agosto, 2011. Disponível em: http://www.mme.gov.br/documents/10584/1985241/Manual%20de%20Tarif%20En%20EI%20-%20Procel_EPP%20-%20Agosto-2011.pdf. Acesso em 14 de Julho de 2015.
- [43] Transporte na Ilha do Fundão: Aprimorando a Sustentabilidade. Fundo Verde. Abril, 2014. Disponível em: <http://www.fundoverde.ufrj.br/index.php/pt/projetos/evte-s>. Acesso em 10 de Fevereiro de 2015.
- [44] Wikipedia, Nissan Leaf. Disponível em: https://en.wikipedia.org/wiki/Nissan_Leaf. Acesso em 18 de Agosto de 2015.
- [45] Fundo Verde, Instalação de medidores inteligentes nas subestações de energia nos blocos do CT. Disponível em: <http://www.fundoverde.ufrj.br/index.php/pt/projetos/programa-energia/subestacoes-ct>. Acesso em 14 de Agosto de 2015.
- [46] DE OLIVEIRA, G. F.; BRUNIONI, R. E. **Criação de uma ferramenta para gerenciamento do consumo da energia contratada na Universidade Federal do Rio de Janeiro**. Projeto de fim de curso para grau em Engenharia na UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 2007.
- [47] D'AVILA, Tiago da Costa Pinto. **Sistema Online de Gerenciamento de Consumo de Energia Elétrica e Demanda Contratada, Aplicado à Universidade Federal do Rio de Janeiro**. Projeto de fim de curso para grau em Engenharia na UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 2008.
- [48] SIMON, Emanuel Cella. **Avaliação de impactos de recarga de veículos elétricos em sistemas de distribuição**. 2013. Tese de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro.

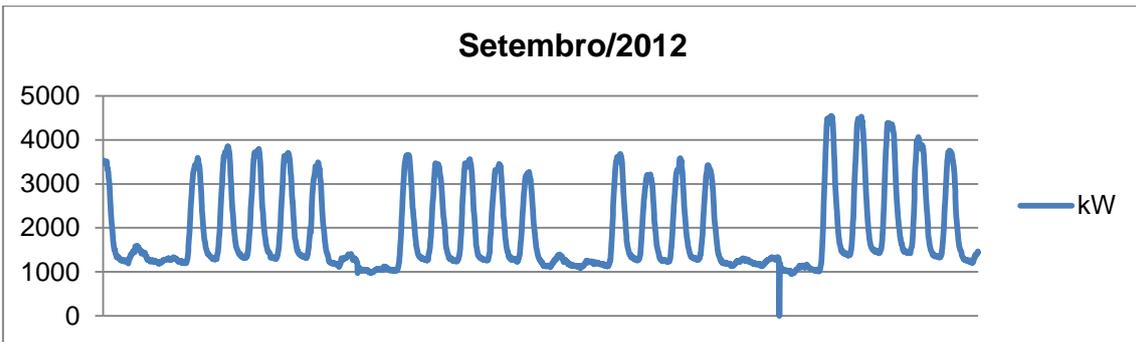
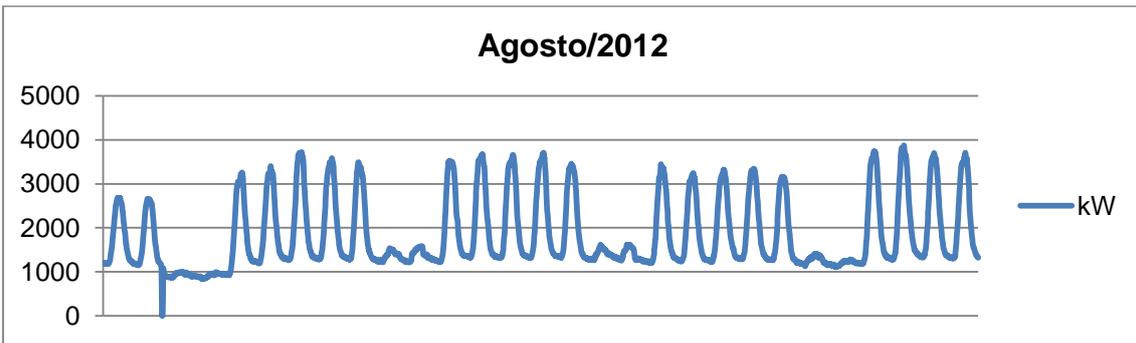
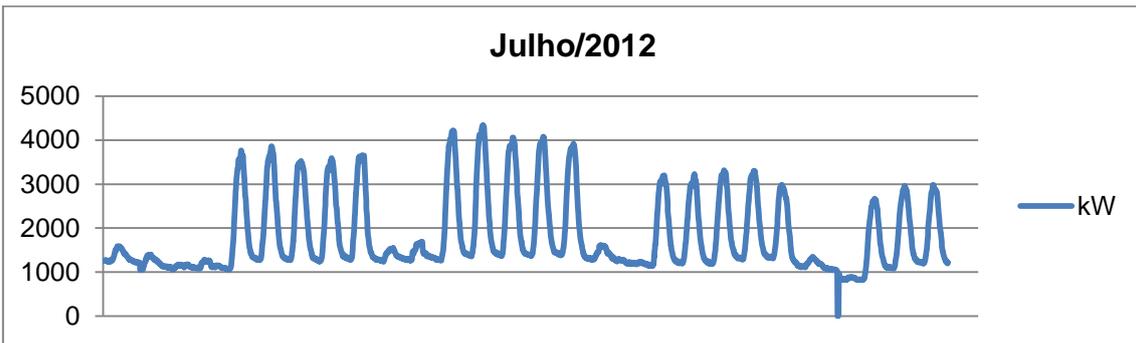
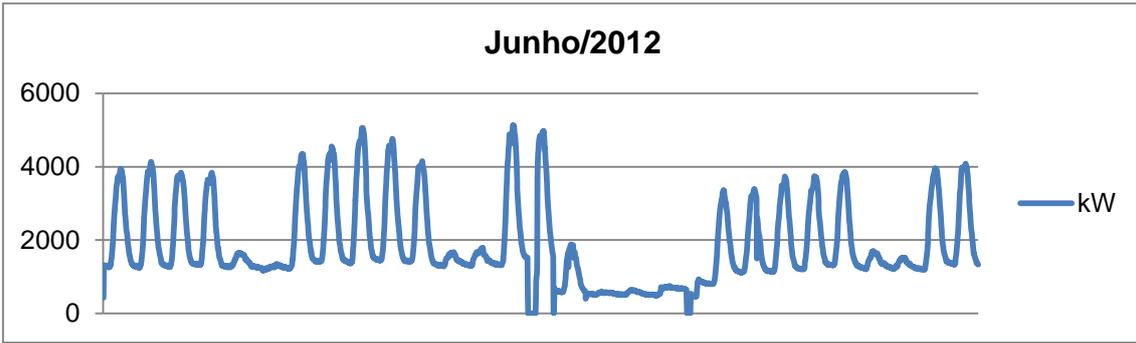
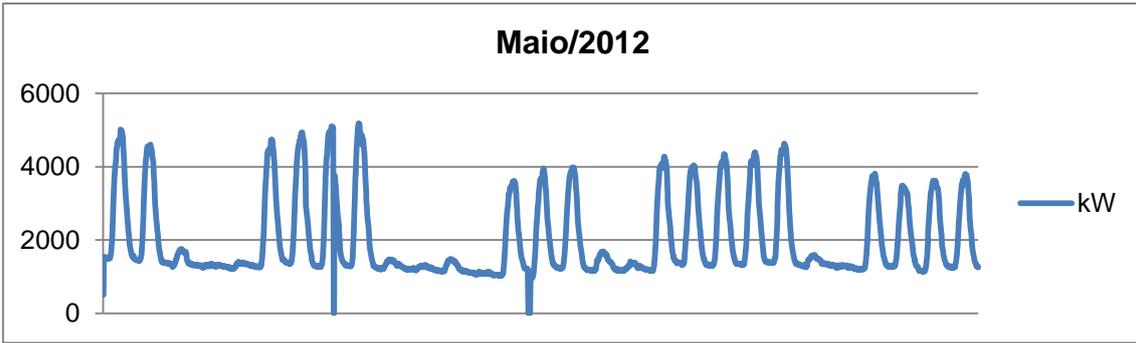
APÊNDICE A

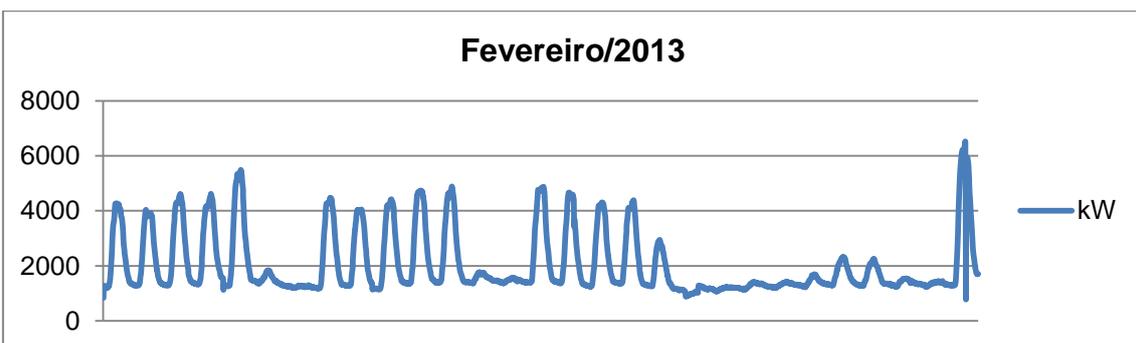
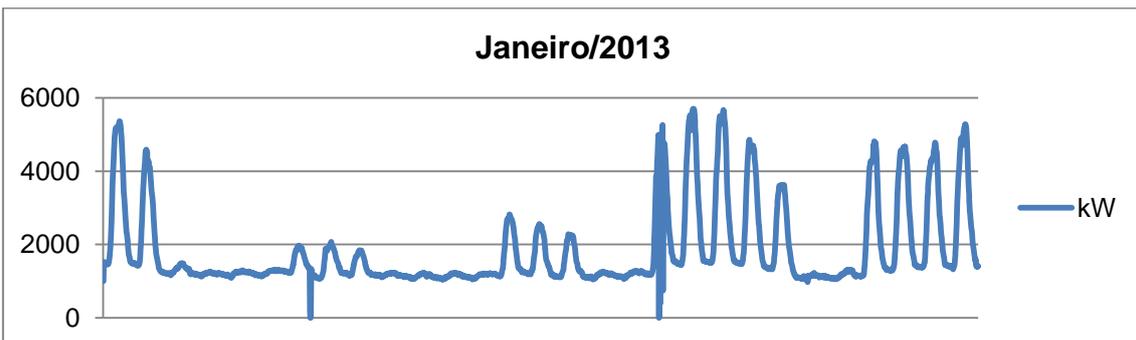
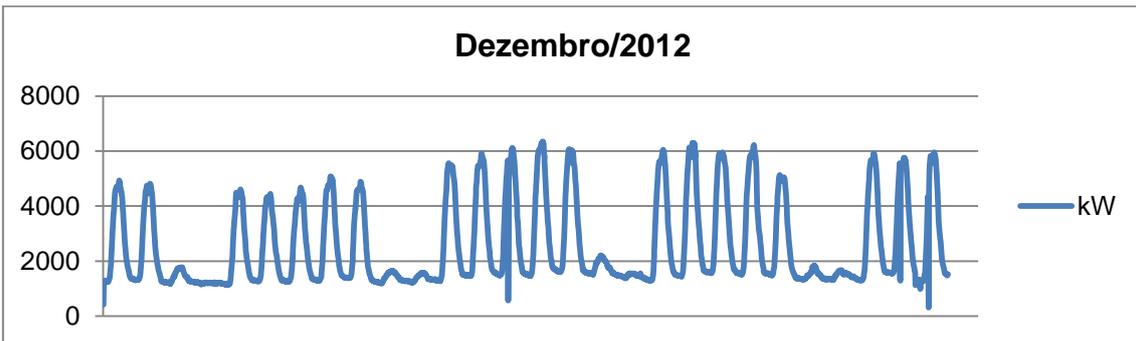
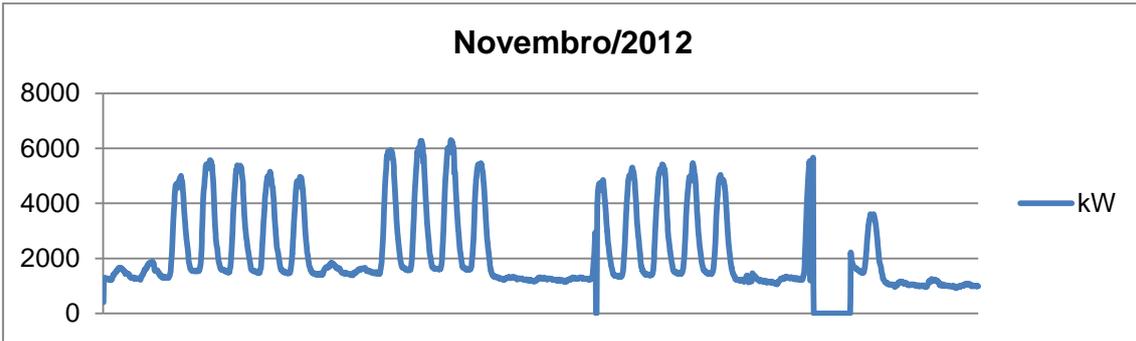
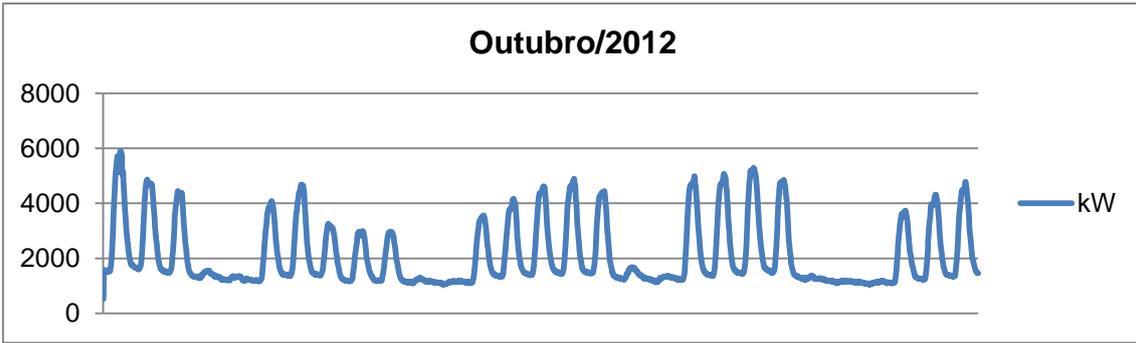
MEMÓRIA DE MASSA

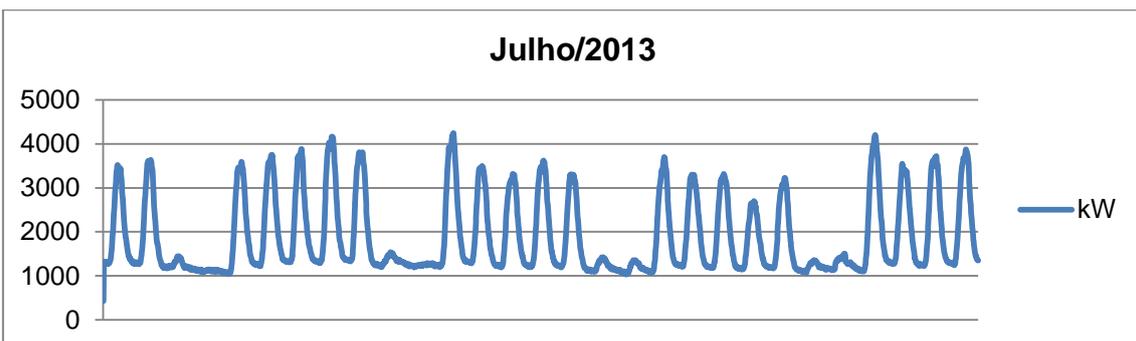
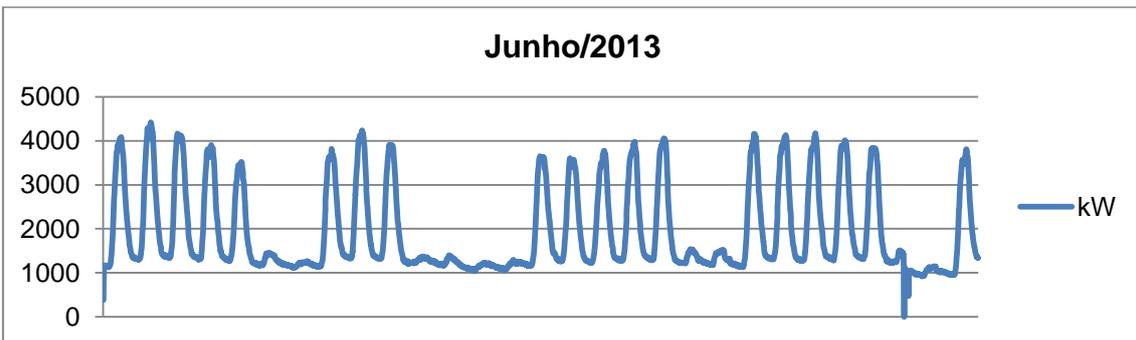
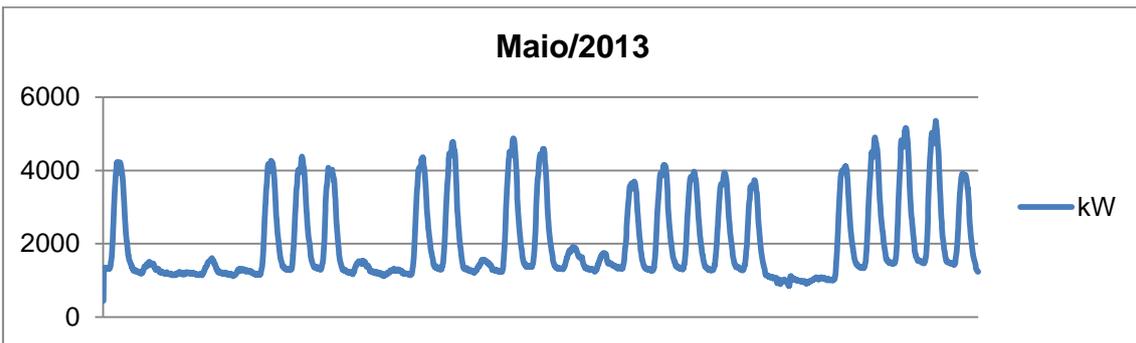
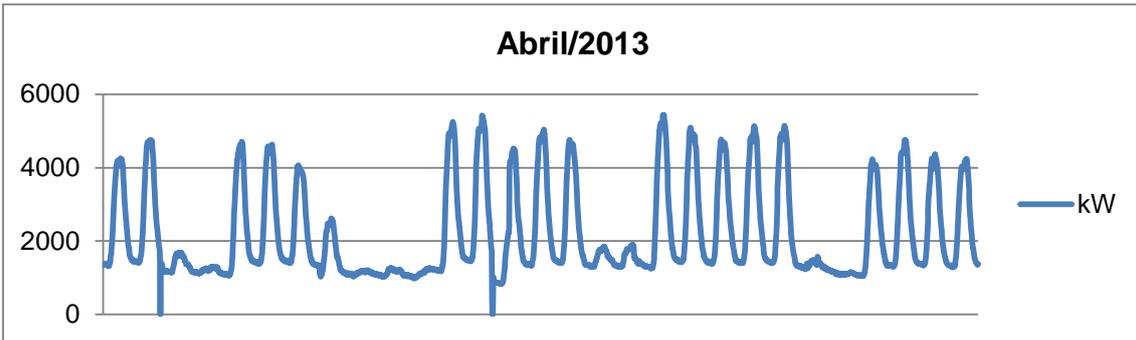
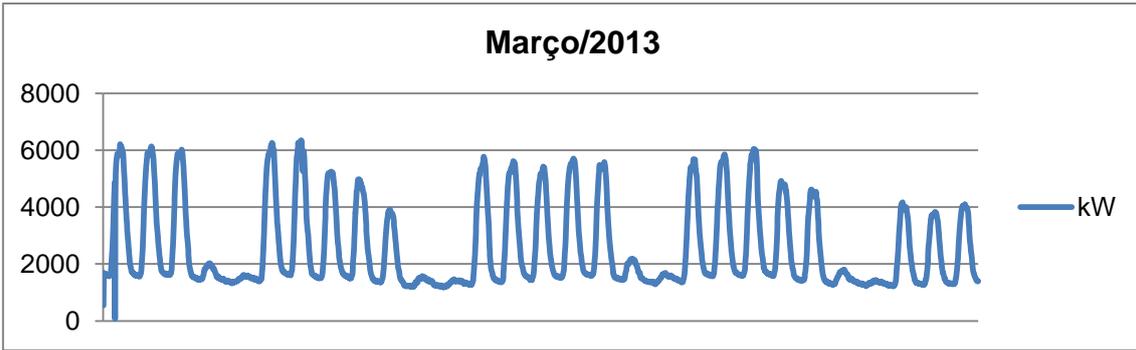
A seguir serão apresentadas todas as curvas referentes aos dados de massa do Centro de Tecnologia entre Fevereiro de 2012 e Março de 2015. Os dados foram disponibilizados pela concessionária Light Serviços de Eletricidade S.A. para o Escritório de Planejamento do Centro de Tecnologia, através de arquivos de MS Excel.

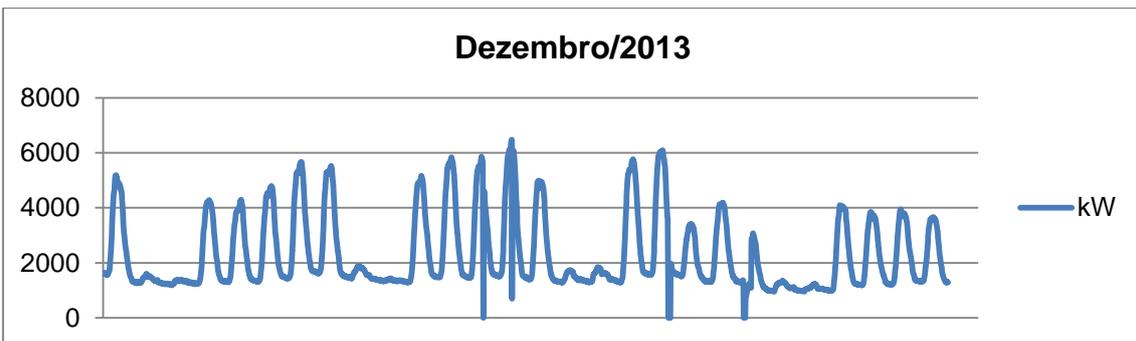
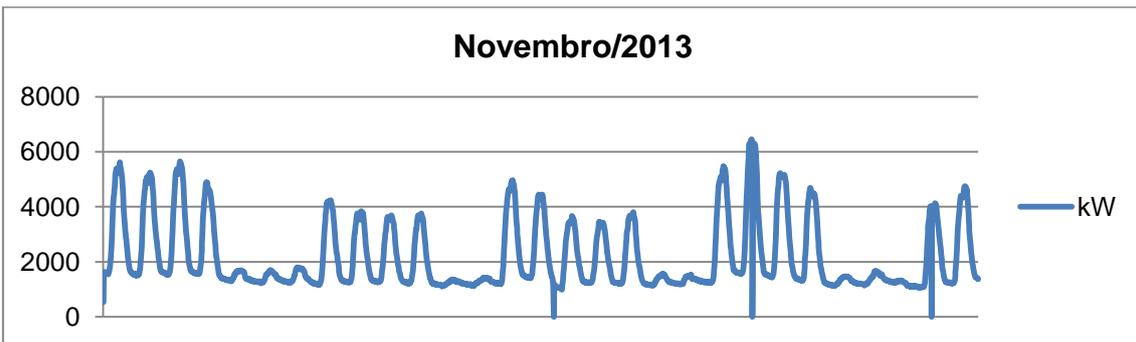
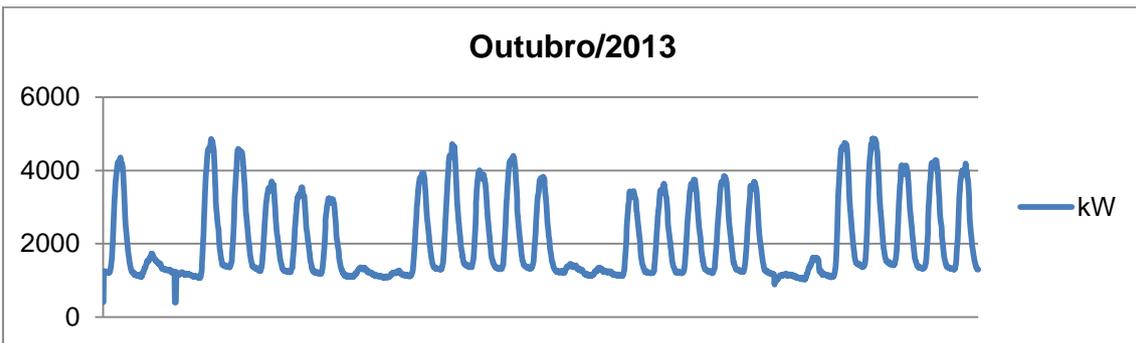
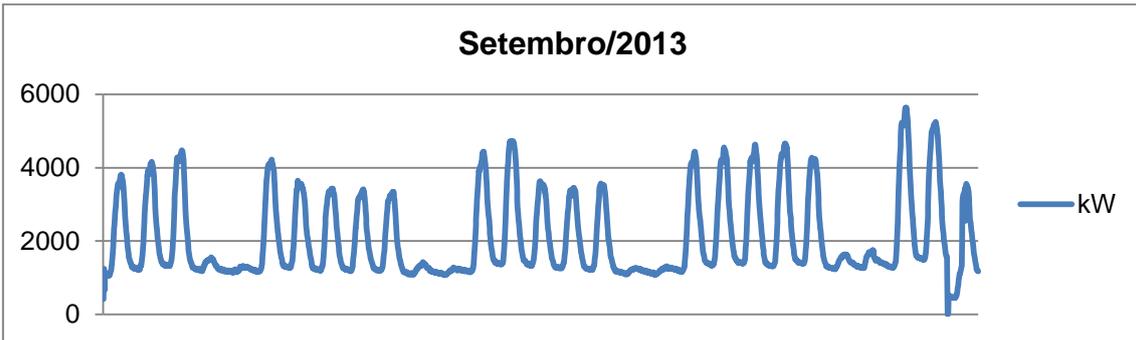
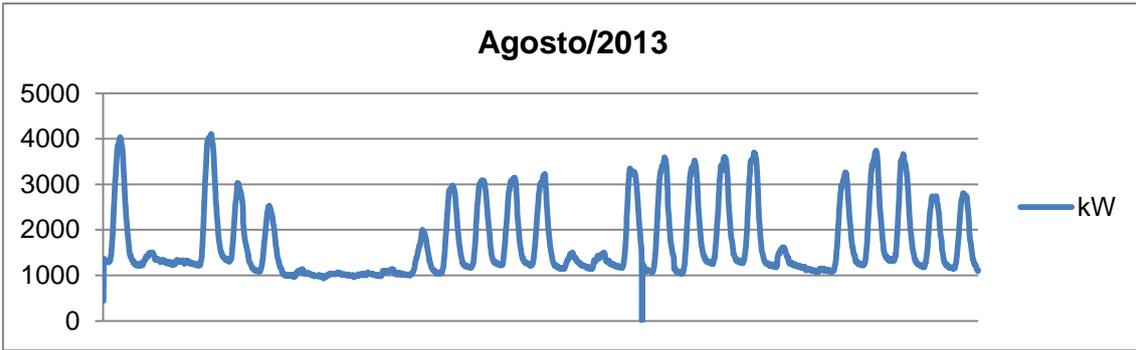
Somente com a análise dos dados de energia elétrica é possível saber quais foram os períodos de férias, recessos e os feriados do ano. Além disso, é possível determinar se os desligamentos foram devido à ultrapassagem da limitação do alimentador ou por algum outro motivo externo. Percebe-se também o aumento da demanda nos períodos úmidos, tendo causa provável o uso de aparelhos de ar condicionado.

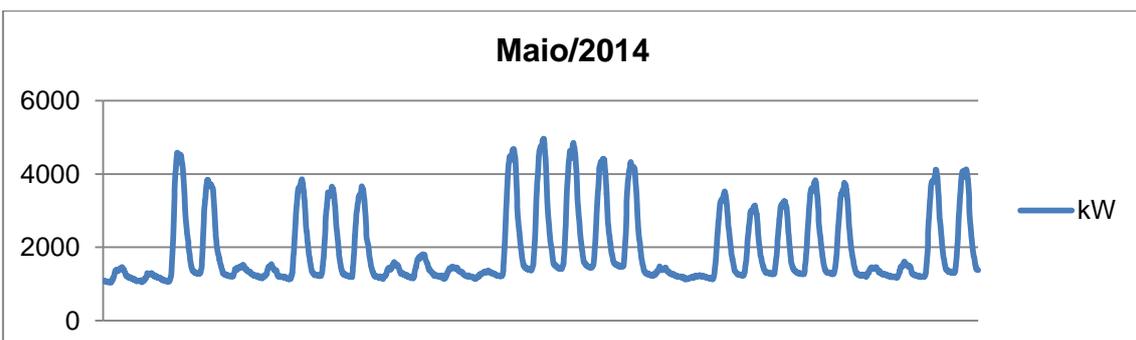
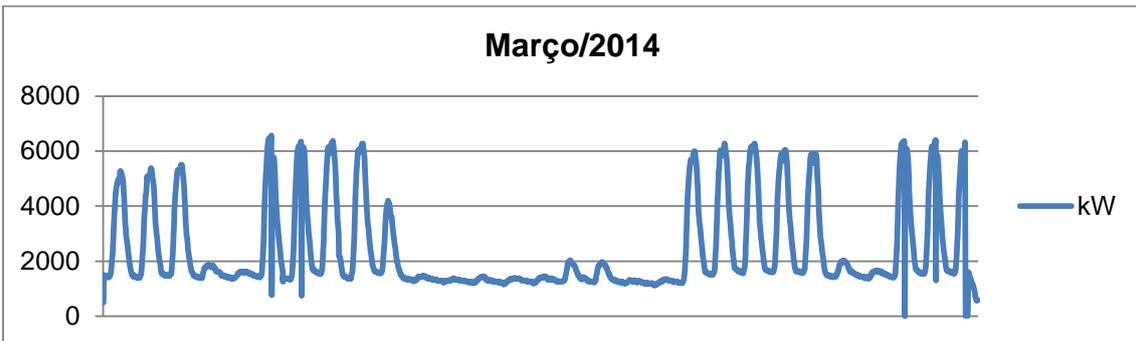
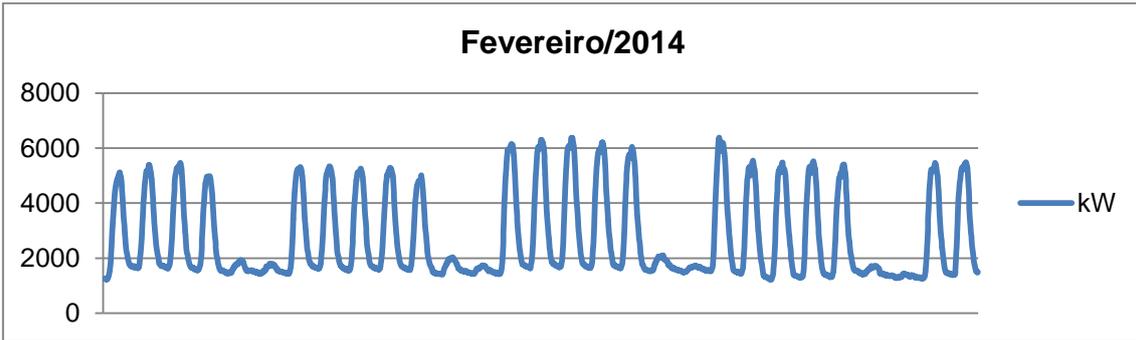
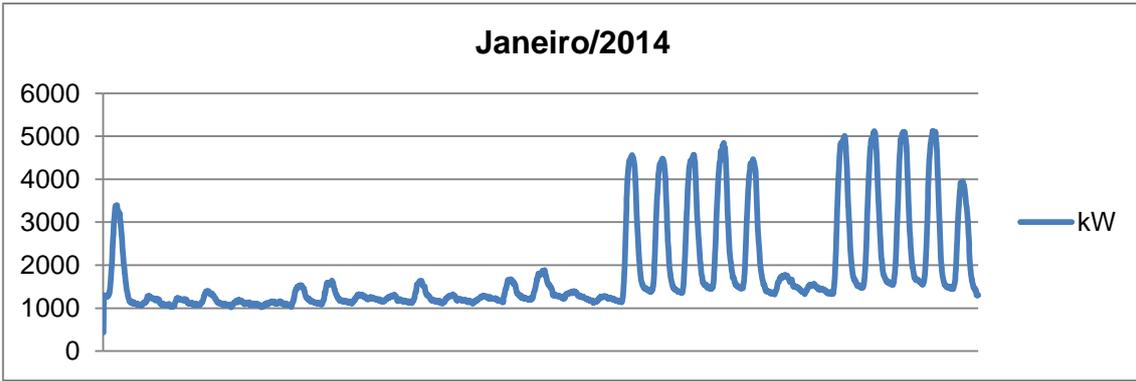


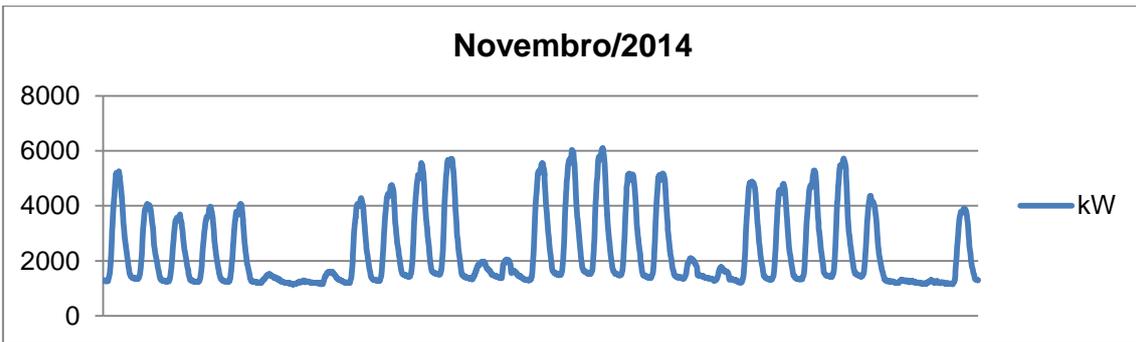
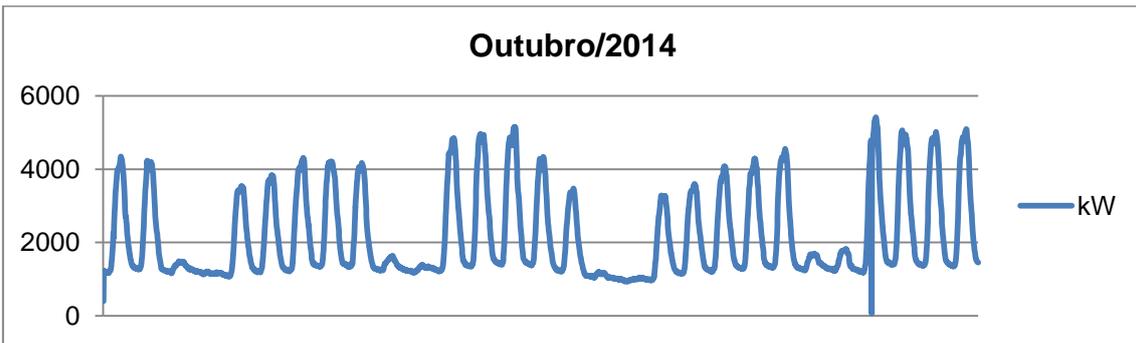
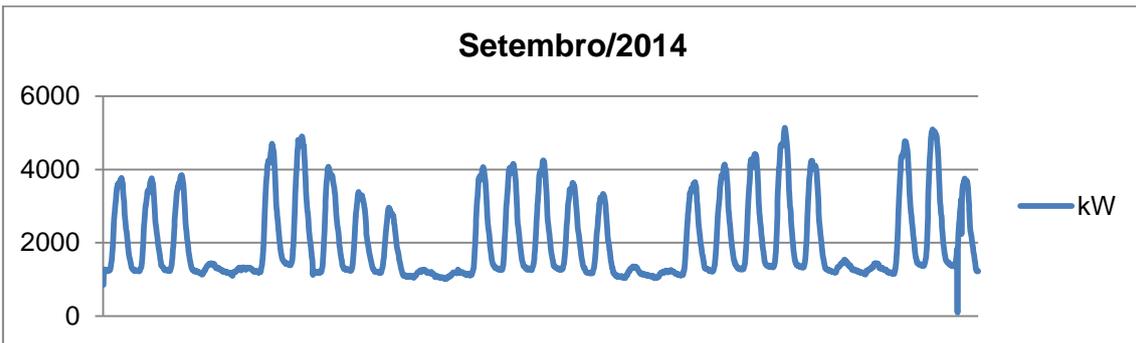
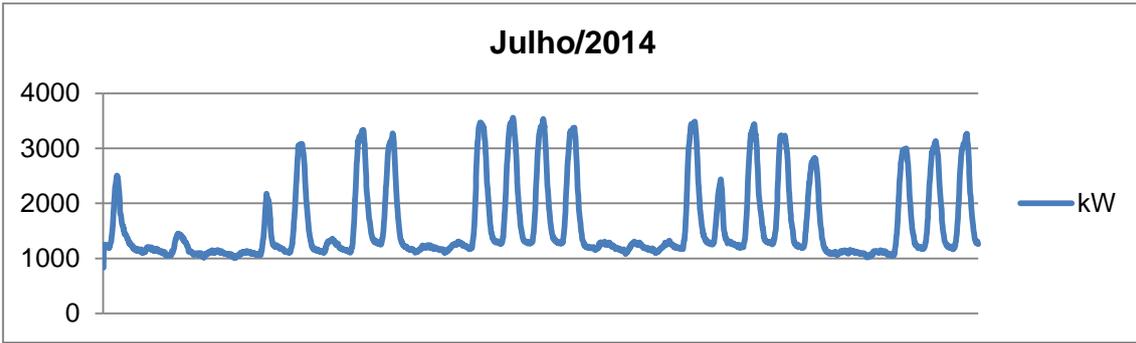
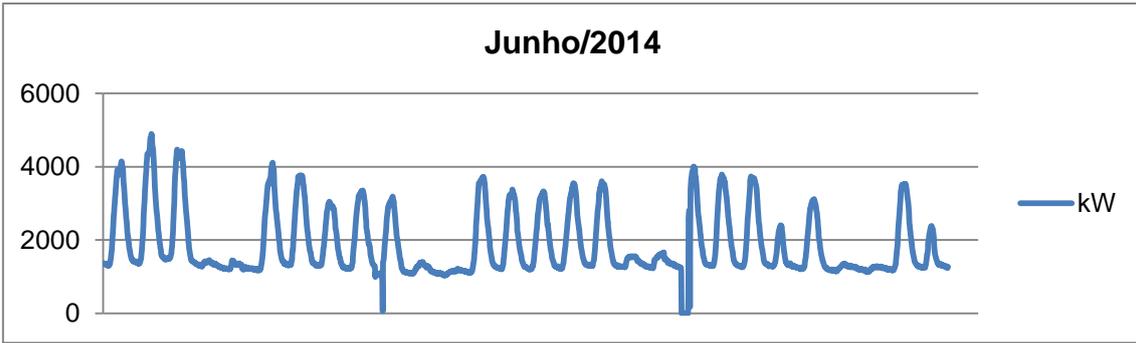


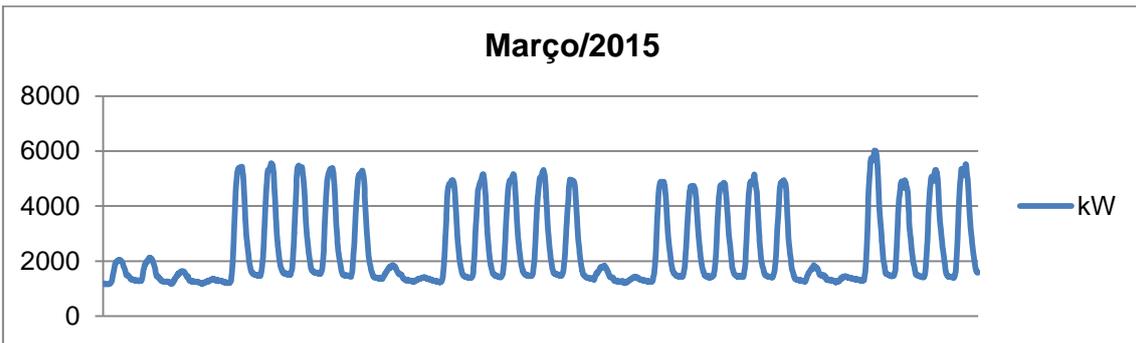
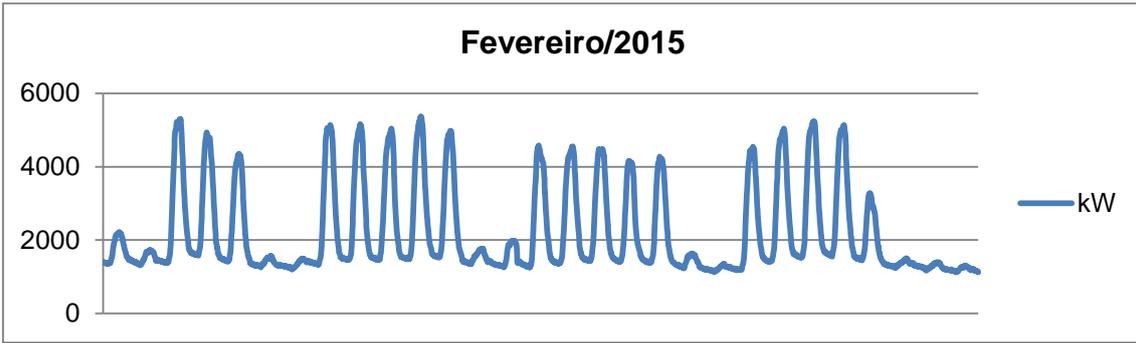
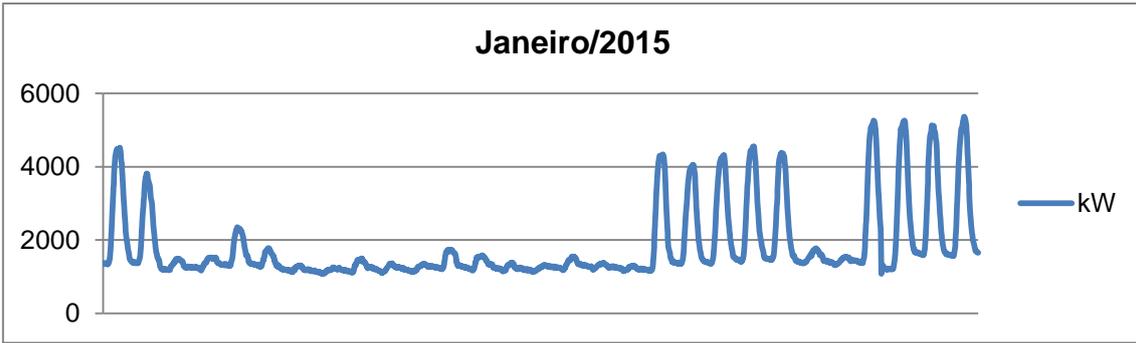












APÊNDICE B

TESTE DE DESCARGA E CÁLCULO DA EFICIÊNCIA DO VEÍCULO

Para fins de entendimento do comportamento de descarga da bateria do VE utilizado nos estudos e prever a eficiência em km/kWh foi realizado um único teste, dividido em três trechos. Objetivando obter dados mais compatíveis com a realidade de trânsito da cidade do Rio de Janeiro, optou-se por levar o carro até a Zona Sul, onde o fluxo de veículos é elevado em vários períodos do dia. Outras motivações para a escolha do trecho foram: a maior parte dos veículos estacionado no Centro de Tecnologia origina-se dessa localidade e existe a possibilidade de recarregar o veículo em um posto de recarga rápida em um dos bairros.

Iniciou-se anotando manualmente as grandezas autonomia, quilometro rodado e hora, disponíveis no painel do veículo, em intervalos de 5 minutos. A premissa foi alterada no início do primeiro percurso para conseguir mais pontos e perceber melhor questões de recarga através de frenagem regenerativa. Optou-se então por anotar em períodos de 1 minuto ou quando houvesse uma variação significativa na autonomia.

O veículo saiu da Ilha do Fundão com 100% de carga, portanto a energia armazenada na bateria foi considerada igual a 24kWh, registrando uma autonomia de 109km.

Cálculo da eficiência

Para o cálculo da eficiência do veículo foi aplicada a Equação B-1 em cada trecho. Escolheu-se utilizar a média dos valores encontrados, chegando a 4,35km/kWh para a eficiência do Nissan LEAF.

Para certificar que o valor selecionado era compatível, calculou-se a autonomia final prevista. Nos trechos 1 e 3, a média da eficiência levou a um valor bem próximo a autonomia final registrada. Já no segundo trecho, o valor final para a autonomia destoou do resto da curva, portanto, considerou-se o penúltimo registro para os cálculos, sendo esse também próximo ao valor calculado.

$$\varepsilon = \frac{a}{E} \quad (\text{Equação B-1})$$

Tabela B-1: Cálculo da eficiência do VE em estudo

	Δs (km)	a_o (km)	a_f (km)	E_o (kWh)	ε (km/kWh)	E_f (kWh)	a_f (km) CALCULADA
TRECHO 1	13	109	92	24	4,5417	21,14	91,96
TRECHO 2	7	107	90	23,56	4,5416	22,02	95,79
TRECHO 3	26	89	66	22,43	3,9679	15,88	69,07

Trecho 1: UFRJ Cidade Universitária – Posto Escola Lagoa*Tabela B-2: Registros do Trecho 1*

HORA	km rodado	AUTONOMIA (km)
11:32:00	8288	109
11:37:00	8291	103
11:42:00	8291	103
11:47:00	8291	100
11:49:00	8291	101
11:50:00	8292	102
11:52:00	8292	103
11:54:00	8292	101
11:56:00	8292	102
11:58:00	8292	101
12:00:00	8292	101
12:02:00	8293	101
12:04:00	8293	101
12:05:00	8293	100
12:06:00	8294	99
12:07:00	8294	99
12:07:00	8294	93
12:07:00	8295	92
12:08:00	8296	90
12:08:00	8296	88
12:09:00	8297	87
12:09:00	8297	89
12:10:00	8298	90
12:10:00	8299	91
12:11:00	8299	94
12:11:00	8299	95
12:12:00	8299	96
12:13:00	8299	94
12:14:00	8300	94
12:14:00	8300	93
12:15:00	8301	92
TOTAL	00:43:00	13
		17

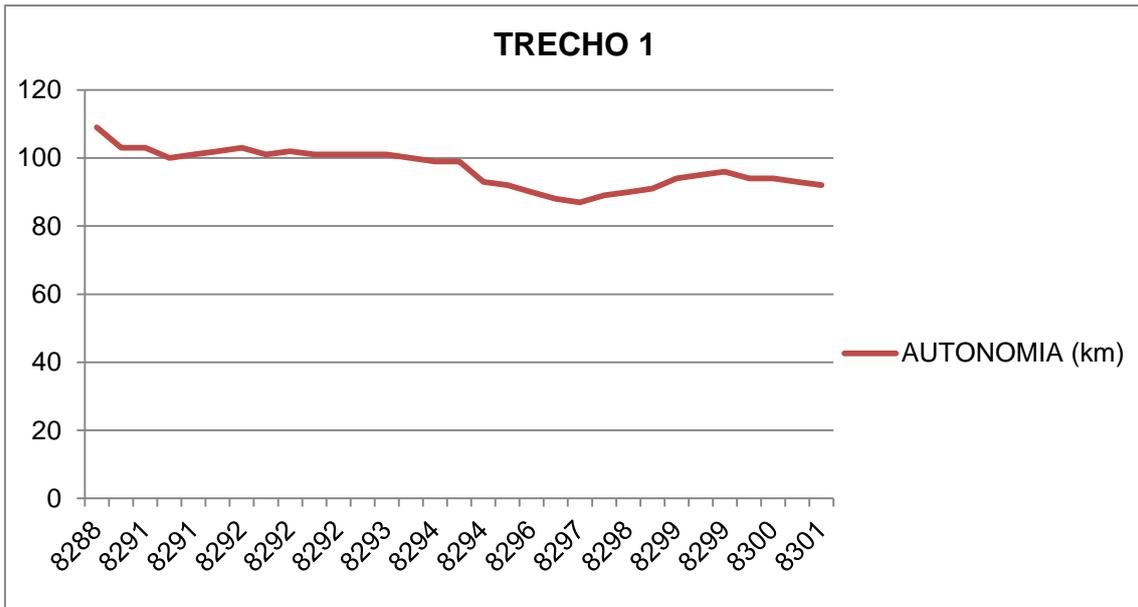


Figura B-6-1: Gráfico dos registros do Trecho 1

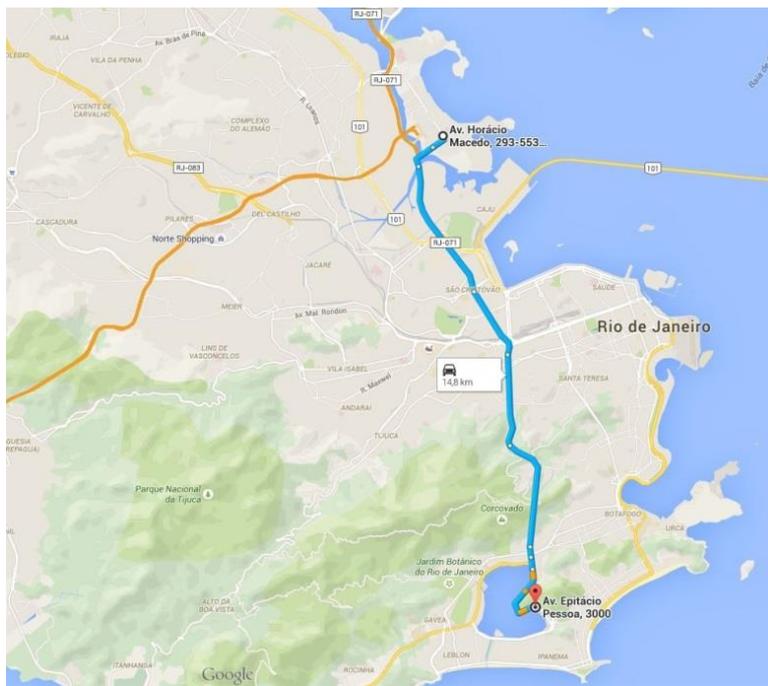


Figura B-6-2: Caminho realizado no Trecho 1

Trecho 2: Posto Escola Lagoa – UFRJ Campus Praia Vermelha

Tabela B-3: Registros do Trecho 2

HORA	km rodado	AUTONOMIA (km)	
12:37:00	8301	107	
12:38:00	8301	106	
12:39:00	8301	105	
12:40:00	8302	105	
12:41:00	8302	105	
12:42:00	8302	105	
12:43:00	8302	105	
12:44:00	8302	105	
12:45:00	8302	104	
12:46:00	8302	103	
12:47:00	8303	103	
12:48:00	8303	103	
12:48:00	8303	103	
12:51:00	8303	103	
12:52:00	8303	102	
12:52:00	8303	102	
12:53:00	8304	100	
12:54:00	8305	98	
12:55:00	8305	99	
12:56:00	8306	97	
12:57:00	8306	96	
12:58:00	8306	96	
12:59:00	8306	96	
13:00:00	8306	96	
13:01:00	8306	96	
13:02:00	8306	93	
13:03:00	8306	93	
13:04:00	8307	93	
13:05:00	8307	92	
13:05:00	8307	92	
13:06:00	8307	91	
13:08:00	8307	90	
13:10:00	8307	90	
13:11:00	8308	90	
13:12:00	8308	82	
TOTAL	00:35:00	7	25

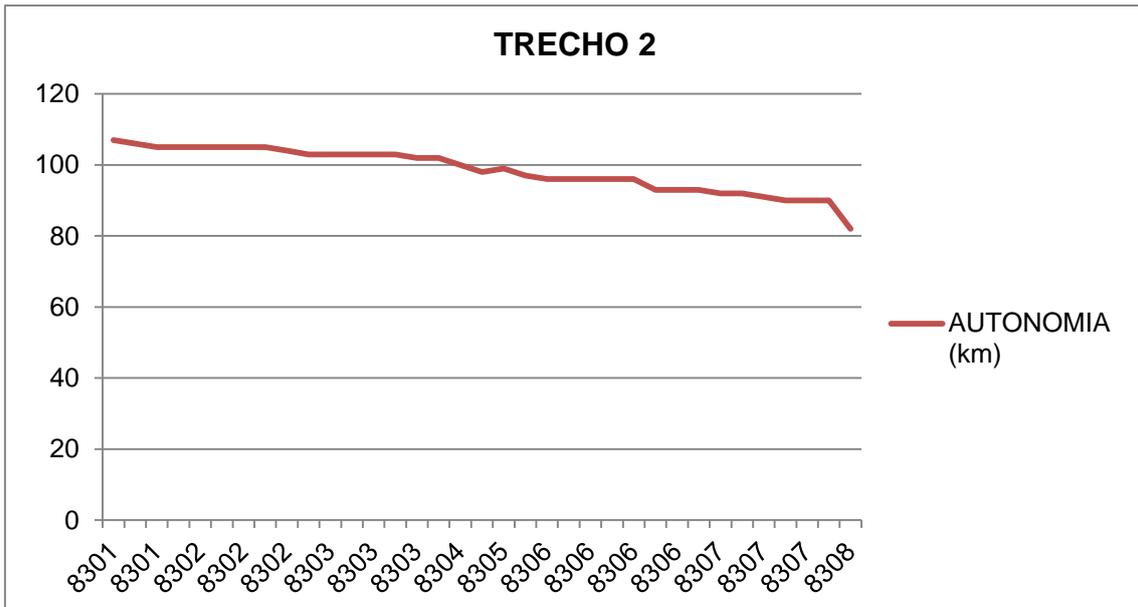


Figura B-6-3: Gráfico dos registros do Trecho 2

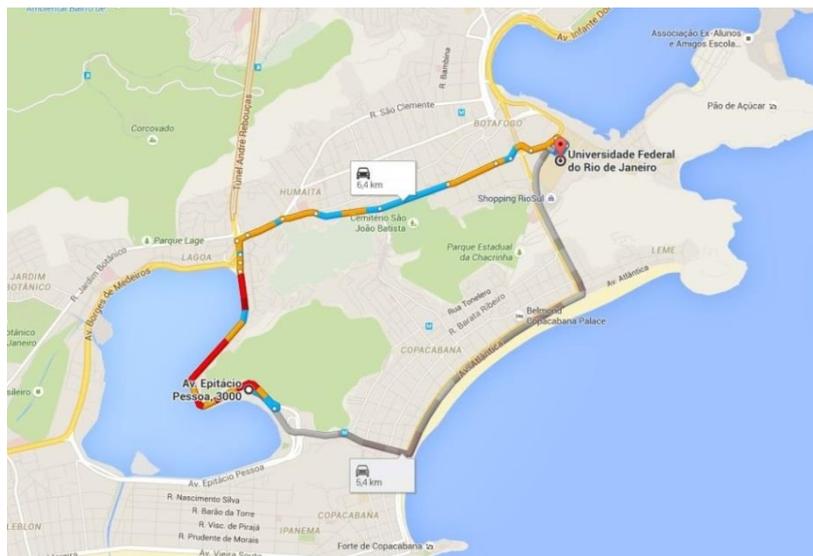


Figura B-6-4: Caminho realizado no Trecho 2

Trecho 3: UFRJ Campus Praia Vermelha – UFRJ Cidade Universitária*Tabela B-4: Registros do Trecho 3*

HORA	km rodado	AUTONOMIA (km)
13:34:00	8308	89
13:35:00	8308	88
13:36:00	8309	89
13:36:00	8309	88
13:37:00	8310	88
13:37:00	8311	88
13:38:00	8311	87
13:38:00	8312	88
13:39:00	8312	89
13:40:00	8313	88
13:40:00	8314	89
13:40:00	8314	88
13:41:00	8315	89
13:41:00	8315	90
13:42:00	8316	91
13:43:00	8316	91
13:44:00	8317	90
13:44:00	8317	82
13:45:00	8317	82
13:46:00	8318	82
13:47:00	8319	80
13:48:00	8318	80
13:49:00	8318	78
13:50:00	8319	78
13:51:00	8219	78
13:53:00	8319	77
13:54:00	8319	76
13:55:00	8319	76
13:56:00	8320	74
13:57:00	8320	74
13:58:00	8320	74
13:59:00	8320	73
14:00:00	8321	73
14:01:00	8321	73
14:01:00	8321	72
14:02:00	8322	72
14:03:00	8322	72
14:04:00	8322	71
14:04:00	8323	71
14:05:00	8323	71
14:06:00	8323	71
14:07:00	8323	72
14:08:00	8324	71
14:08:00	8324	71
14:09:00	8324	70

14:10:00	8324	70
14:10:00	8325	68
14:10:00	8326	68
14:11:00	8326	68
14:11:00	8327	69
14:12:00	8327	68
14:12:00	8327	69
14:13:00	8328	69
14:13:00	8328	70
14:13:00	8329	70
14:14:00	8329	68
14:14:00	8330	67
14:15:00	8330	69
14:15:00	8331	70
14:16:00	8332	70
14:17:00	8333	69
14:18:00	8333	69
14:19:00	8334	66
TOTAL	00:45:00	26
		23

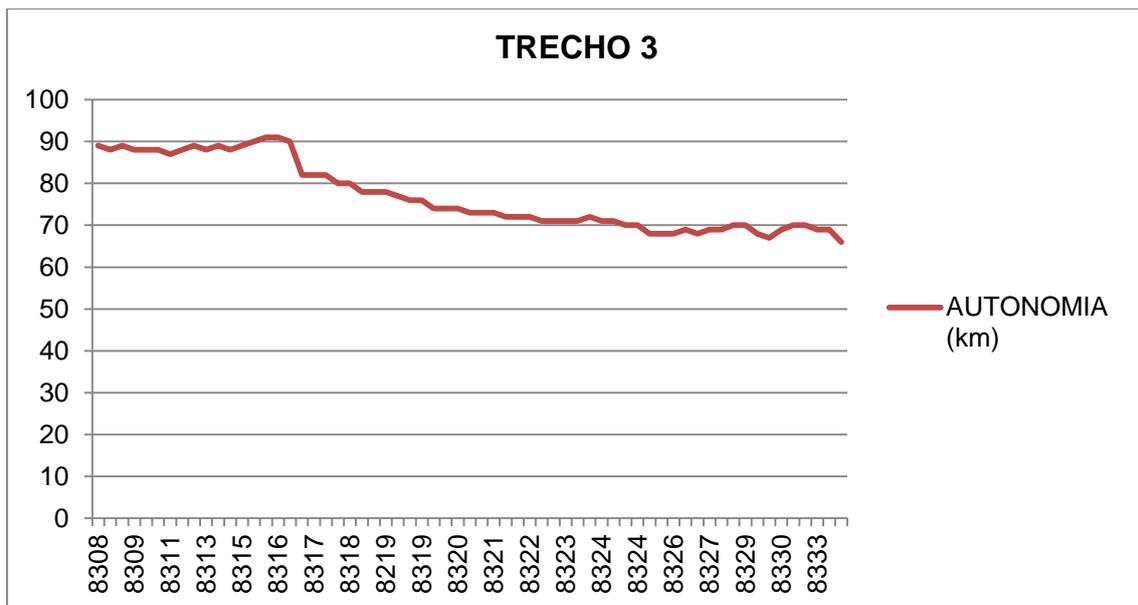


Figura B-6-5: Gráfico dos registros do Trecho 3

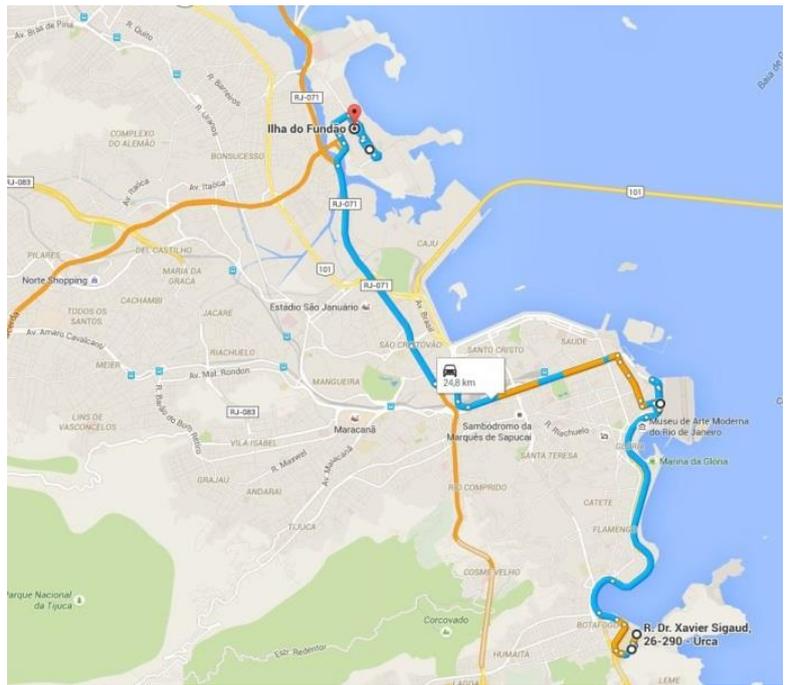


Figura B-6-6: Caminho realizado no Trecho 3