



**Universidade de Brasília – UnB
Faculdade UnB Gama – FGA
Curso de Engenharia de Energia**

**Veículos elétricos: estudo preliminar das estratégias
de suprimento de energia por eletroposto solar
fotovoltaico**

**Autora: Gabrielle Monique Maciel de Oliveira Baracho
Orientador: Jorge Andrés Cormane Angarita
Co-orientador: Augusto César de Mendonça Brasil**

**Gama, DF
2016**



Gabrielle Monique Maciel de Oliveira Baracho

VEÍCULOS ELÉTRICOS: estudo preliminar das estratégias de suprimento de energia por eletroposto solar fotovoltaico

Monografia submetida ao curso de graduação em engenharia de energia da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Energia.

Orientador: Professor Doutor Jorge Andrés Cormane Angarita.

Co-orientador: Professor Doutor Augusto César de Mendonça Brasil

**Gama, DF
2016**



VEÍCULOS ELÉTRICOS

Gabrielle Monique Maciel de Oliveira Baracho

Monografia submetida como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Energia da Faculdade UnB Gama – FGA, da Universidade de Brasília, em 24/06/2016 apresentada e aprovada pela banca examinadora abaixo assinada:

Professor Doutor: Jorge Andrés Cormane Angarita, UnB/ FGA
Orientador

Professor Doutor: Augusto César de Mendonça Brasil, UnB/ FGA
Co-orientador

Professor Doutor: Luciano Gonçalves Noletto, UnB/ FGA
Membro Convidado

Professora Doutora: Loana Nunes Velasco, UnB/ FGA
Membro Convidada

Este trabalho é dedicado à minha família.

Os vencedores da batalha da vida são homens perseverantes que, sem se julgarem gênios, se convenceram de que só pelo esforço e perseverança poderiam chegar ao fim almejado.

Ralph Waldo Emerson

RESUMO

Os veículos elétricos (VE's) vêm sendo novamente inseridos no mercado automotivo mundial como uma aposta para amenizar os impactos ambientais causados pelos veículos à combustão. Entretanto, trata-se ainda de um alto investimento inicial adicionado a limitada autonomia e infraestrutura de carregamento. No Brasil, apesar dos veículos elétricos não terem participação efetiva no mercado, estudos vêm sendo feitos para estimular e propor medidas de adesão de veículos elétricos na frota de empresas públicas e privadas, além dos consumidores particular. Este trabalho visa estudar o ciclo energético diário de um VE sob o ponto de vista de que este poderá ser uma unidade inteligente de mobilidade, consumo e geração de energia conectado a um eletroposto solar fotovoltaico.

Palavras-chave: Veículo elétrico. Eletroposto solar fotovoltaico.

ABSTRACT

Electrical vehicles have been inserted again in the global automotive market as a bid to mitigate the environmental impacts caused by vehicle combustion. However, electrical vehicles still have a high initial investment added to limited autonomy and charging infrastructure. In Brazil, despite the electric vehicles do not have an effective participation in the market, studies have been made to stimulate and propose accession measures of electrical vehicles in the fleet of public and private companies, also private consumers. This work aims to study the daily energy cycle of a EV from the point of view that this may be a smart drive mobility, consumption and power generation connected to a photovoltaic solar electric station.

Keywords: Electrical vehicle. Photovoltaic solar station.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Emissões de CO ₂ por fonte e por setor (%).....	12
Figura 2. Descoberta de petróleo mundial, reservas remanescentes e o consumo cumulativo	13
Figura 3. A evolução dos veículos elétricos no mercado	16
Figura 4. Comparação do preço da gasolina com energia elétrica	17
Figura 5. Comparação de um veículo elétrico e a combustão	18
Figura 6. Característica velocidade-torque do motor elétrico	19
Figura 7. Esquema do funcionamento do veículo elétrico a bateria	20
Figura 8. Funcionamento do veículo elétrico híbrido plugável – configuração em série	21
Figura 9. Funcionamento do veículo elétrico híbrido plugável – configuração em paralelo	21
Figura 10. Conexão do banco de baterias com o banco de ultracapacitores	22
Figura 11. Padrões de comportamento do usuário	23
Figura 12. Modo de operação (G2V) e (V2G)	26
Figura 13. Impacto do V2G na carga da rede elétrica.....	28
Figura 14. Blocos funcionais do SFV integrado com a rede elétrica	29
Figura 15. Conexão dos módulos em série.....	31
Figura 16. Conexão dos módulos em paralelo	31
Figura 17. Inversor para a conexão de módulos fotovoltaicos à rede elétrica.....	33
Figura 18. Recarga condutiva residencial	35
Figura 19. Conector SAE J1772.....	36
Figura 20. Fluxo de energia para cenário considerado	37
Figura 21. Veículo convencional utilizado: Chery S18	38
Figura 22. Trajetória do veículo.....	38
Figura 23. Forças atuantes na dinâmica do veículo na subida.....	39
Figura 24. Força de arrasto na locomoção do veículo	40
Figura 25. Perfil do consumo de energia na ida	41
Figura 26. Perfil do consumo de energia na volta	42
Figura 27. Características da eficiência em motores elétricos típicos	43
Figura 28. Relação RPM entre o motor à combustão e o motor elétrico	43
Figura 29. Inclinação dos módulos fotovoltaicos	44
Figura 30. Irradiação solar diária média para Brasília – DF	45
Figura 31. Irradiação diária em Brasília.....	45
Figura 32. Mapa solarimétrico do Brasil	46

LISTAS DE TABELAS

Tabela 1. Modos de carregamento e infraestrutura requerida.....	25
Tabela 2. Escolha do ângulo de inclinação do módulo	32
Tabela 3. Tipos de carga previsto pela norma	36
Tabela 4. Especificações técnicas do painel fotovoltaico	44
Tabela 5 – Especificação técnica do inversor.	47
Tabela 6. Análise econômica do eletroposto solar fotovoltaico	49
Tabela 7. Custos comparativos	50

LISTAS DE ABREVIATURAS

FGA – Faculdade do Gama.
SFV – Sistema Fotovoltaico.
VCI – Veículo à Combustão Interna.
VE – Veículo Elétrico.
RE – Rede Elétrica.
V2G – Vehicle-to-grid.
G2V – Grid-to-vehicle.

LISTAS DE SIGLAS

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica.
UnB – Universidade de Brasília.
EUA – Estados Unidos da América

LISTAS DE SÍMBOLOS

M_v – Massa do veículo

F_{tf} – Tração dianteira

F_{tr} – Tração traseira

F_r – Força resultante

F_{rf} – Resistência dianteira

F_{rr} – Resistência traseira

F_w – Força de arrasto aerodinâmico

F_g – Força peso

C_D – Coeficiente de arrasto aerodinâmico

V_w – Componente da velocidade do vento

ρ – Densidade do ar

A_f – Área frontal do veículo

f_r – Coeficiente de atrito ao rolamento

α – Ângulo de inclinação da rodovia em relação com a horizontal

F_{rd} – Força de resistência da rodovia

F_f – Força de atrito

V_v – Velocidade do veículo no instante t

H – Altitude do local

L – Distância percorrida

η_t – Eficiência de transmissão

η_m – Eficiência do motor

γ – Fator de frenagem regenerativa

$P_{veiculo}$ – Potência máxima da V2G

E_s – Energia armazenada disponível em DC para o inversor

d_d – Distância em milhas percorrida desde que a energia armazenada estava completa

d_{rb} – Distância em milhas da faixa de buffer requerido pelo motorista

t_{disp} – Tempo que a energia armazenada é despachada em horas

E_p – Energia produzida pelo módulo diariamente

E_s – Insolação diária

A_{mod} – Área da superfície do módulo

SUMÁRIO

RESUMO	6
ABSTRACT	7
1. INTRODUÇÃO	12
1.1 OBJETIVO GERAL	14
1.1.1 Objetivos específicos.....	14
1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	14
1.3 METODOLOGIA DE PESQUISA	15
2. REVISÃO DA LITERATURA	16
2.1 VEÍCULO ELÉTRICO.....	16
2.1.1 Características dos veículos elétricos.....	18
2.1.2 Tipos de veículos elétricos	19
2.1.3 Comportamento do motorista	22
2.1.4 Tipos de carregamento.....	24
2.1.5 Vehicle-to-grid (V2G).....	26
2.2 ELETROPOSTO SOLAR FOTOVOLTAICO	28
2.2.1 Módulos fotovoltaicos	29
2.2.2 Inversores.....	33
2.2.3 EVSE – Equipamento de suprimento dos veículos elétricos	35
3. MATERIAIS E MÉTODOS	37
3.1 CENÁRIO PROPOSTO.....	37
3.2 ENERGIA CONSUMIDA PELO VE	38
3.3 ELETROPOSTO	44
3.4 CUSTOS	49
4. COMENTÁRIOS CONCLUSIVOS	51
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	52

1. INTRODUÇÃO

Os Veículos Elétricos (VE's) são unidades energéticas que reúnem as modalidades de consumo, geração (pela frenagem regenerativa), armazenamento (conjunto de baterias) e, ainda, a de mobilidade. Esses veículos quando comparados aos Veículos à Combustão Interna (VCI), apresentam alta eficiência energética bem como alta energia de pico, e aceleração rápida decorrente da eficiente resposta do motor elétrico (Ehsani, 2007). Correntes otimistas e moderadas sobre a projeção de veículos elétricos no Brasil acreditam no aumento desse tipo de veículo, diferindo suas opiniões somente acerca da intensidade com que eles seriam introduzidos (Kagan, 2013).

Com a inserção significativa dos VE's na malha de transportes urbanos haverá uma mudança não só em questões ambientais e sociais, mas também na estrutura de um setor complexo como é o setor elétrico brasileiro. No que tange as questões ambientais, no Brasil tem-se que o setor de transporte é o primeiro maior responsável pelas emissões de poluentes atmosféricos que provocam a chuva ácida, o efeito estufa e danos à fauna, à flora e ao próprio homem.

No Brasil este setor de transportes é responsável por aproximadamente 44% das emissões conforme mostra a Fig. (1).

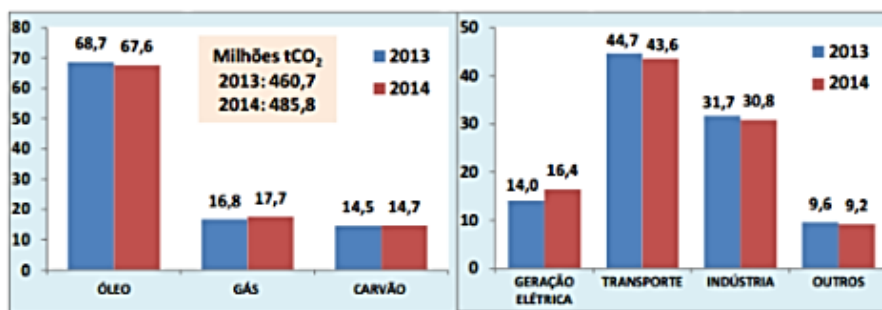


Figura 1. Emissões de CO₂ por fonte e por setor (%)

Fonte: MME, 2015

Os problemas associados ao uso de combustíveis fósseis tem custos altos e indiretos, podendo ser financeiros, humanos, ou os dois. Os custos associados à poluição são as despesas médicas, os custos de replantar florestas devastadas, de limpar e reparar monumentos devido às chuvas ácidas. Entretanto é importante salientar que os

custos médicos são os mais expressivo deles, sem dúvidas, especialmente em países desenvolvidos. Já os custos associados ao aquecimento global são mais difíceis de quantificar, mas eles podem incluir custos de prejuízos causados por furacões, cultivo perdido devido à seca, danos nas propriedades devido as enchentes, além de auxílio internacional para socorrer as populações afetadas. Ainda, como a maioria dos países produtores de petróleo não são grandes consumidores do mesmo, o petróleo tem de ser importado gerando situações delicadas como é atualmente a situação entre os Estados Unidos e o Oriente Médio (Ehsani, 2004).

Outro entrave na continuação do uso de combustíveis fósseis no transporte é o fato de o petróleo ser considerado um recurso finito, que esta ficando cada vez mais difícil e mais caro sua exploração. Acrescentando a isso, a taxa de consumo do petróleo é maior que a taxa de exploração o que faz com que a previsão de uso desse recurso seja estimado até aproximadamente 2038 (Ehsani, 2004).

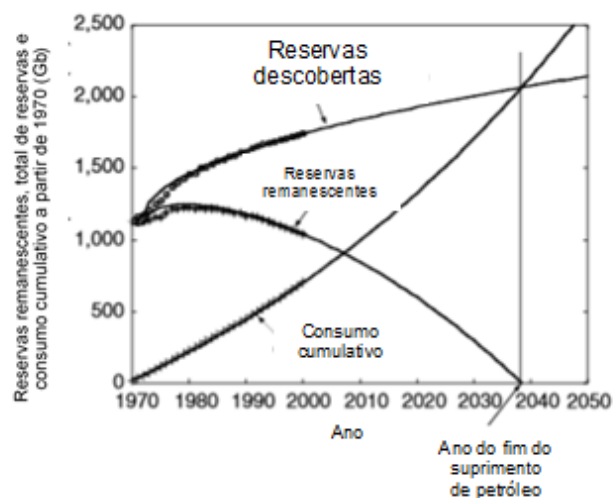


Figura 2. Descoberta de petróleo mundial, reservas remanescentes e o consumo cumulativo

Fonte: Ehsani, 2004 (adaptado).

Tendo isso em vista, é necessário fazer mudanças de paradigmas, considerando formas alternativas de transporte que minimizem esses entraves ao modelo atual de transporte. Devido à relevância do assunto, o presente trabalho tem como objetivo geral abordar o tema de VE's, focando na logística de abastecimento por meio de um eletroposto solar fotovoltaico.

1.1 OBJETIVO GERAL

O presente trabalho tem como objetivo geral analisar o ciclo energético diário de um VE sob o ponto de vista de que este poderá ser uma unidade inteligente de mobilidade, consumo e geração de energia conectado a um eletroposto solar fotovoltaico.

1.1.1 Objetivos específicos

- Estudar os tipos de veículos elétricos, a influência do comportamento do usuário no carregamento do banco de baterias dos VE's;
- Identificar as forças atuantes na dinâmica de um veículo;
- Calcular o consumo energia e a potência para uma determinada trajetória;
- Dimensionar o eletroposto solar fotovoltaico para o abastecimento do VE estudado.
- Comparar os custos para a trajetória de um VE e um VCI.

1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está estruturado em quatro seções. A primeira seção aborda uma visão geral do tema, enfatizando a motivação do trabalho com veículos elétricos inseridos na matriz energética e no setor de transporte. Além disso, define o objetivo geral e os objetivos específicos para o desenvolvimento da proposta, a metodologia de pesquisa e a estrutura do trabalho.

A segunda seção é o referencial bibliográfico relacionado aos tipos de veículos elétricos, comportamento do usuário, estratégias de carregamento, requisitos para o dimensionamento do eletroposto solar fotovoltaico. A terceira seção compreende o estudo da dinâmica do veículo com o cálculo da energia e potência necessárias para definição da estratégia de carregamento, o cenário de estudo proposto, e a especificação do eletroposto solar fotovoltaico para suprimento do VE. Finalmente, a última seção são os comentários conclusivos desse trabalho ao longo de suas etapas de realização.

1.3 METODOLOGIA DE PESQUISA

Inicialmente foi feito um levantamento bibliográfico sobre os veículos elétricos e sua evolução no campo das baterias, infraestrutura de carregamento e políticas regulatórias. Com o auxílio do odômetro e GPS instalado em um veículo a combustão foi possível calcular o consumo de energia e a potência a partir da sua análise dinâmica. Feito isso, foi selecionado um veículo elétrico de porte semelhante ao do veículo à combustão selecionado anteriormente para fazer o dimensionamento do eletroposto solar fotovoltaico.

2. REVISÃO DA LITERATURA

Para efeitos de estudo será imperativo a definição de alguns parâmetros como o tipo de veículo elétrico, o comportamento de um usuário padrão, as formas de carregamento das baterias e o sistema de energia fotovoltaica conectada a rede elétrica. Nas próximas seções serão abordadas com mais detalhes esses parâmetros.

2.1 VEÍCULO ELÉTRICO

Os primeiros veículos elétricos inventados eram mais procurados que os veículos de combustão interna devido à ausência de cheiro e ruído e ao fato de proporcionarem mais conforto e possuírem uma operação mais simples. Contudo, a alta disponibilidade e baixo custo dos derivados petróleo aliado ao desenvolvimento primitivo das baterias, fizeram com que os veículos elétricos começaram a perder espaço no mercado para os a combustão (Kagan, 2013).

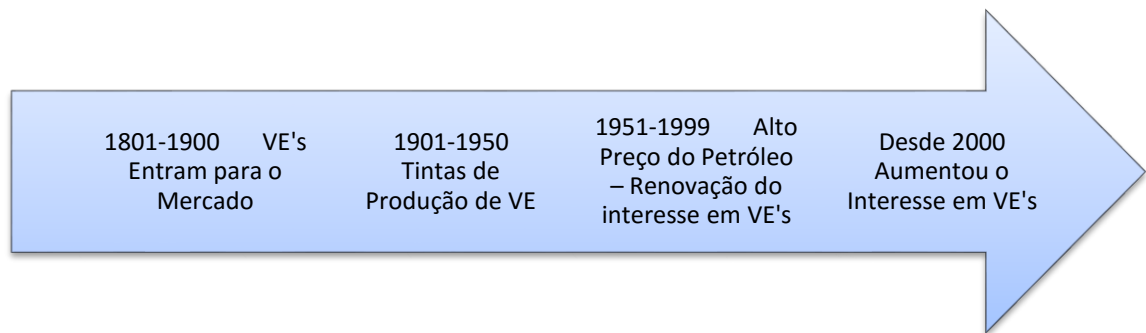


Figura 3. A evolução dos veículos elétricos no mercado

Fonte: Kar, 2013.

Ainda que a matriz de energia elétrica do Brasil seja considerada uma das mais limpas do mundo devido à produção majoritária de energia a partir das usinas hidráulicas, a matriz de transporte apresenta um desempenho de baixa eficiência, tendo em vista a predominância modal rodoviária baseado nos ciclos Diesel e Otto, que é responsável pela maior parte das emissões de CO₂ do setor (Peres, 2011).

De acordo com pesquisas realizadas pelo Laboratório de Poluição Atmosférica Experimental da Universidade de São Paulo (USP) a má qualidade do ar custa pelo menos US\$ 1 bilhão aos cofres públicos brasileiros a cada ano, principalmente com

mortes ou tratamento de doenças associadas direta ou indiretamente com a poluição, tais como dias de trabalho perdidos, redução de ganhos, entre outros. (Peres, 2011)

Tendo isso em vista, houve a necessidade de mudança de paradigmas buscando além da facilidade e conforto dos usuários, o conceito de uso racional de veículos. Os VE's são considerados aliados a esse conceito, o que tem motivado eventos como a 65ª edição do Salão de Frankfurt a apresentarem carros esportivos híbridos ou totalmente elétricos, visando agregar, além do prazer de dirigir e velocidade, valores ambientais com baixa emissão de poluentes. Além da redução de poluentes, a energia elétrica utilizada por esses veículos é mais barata que a gasolina, contribuindo para a sua competitividade e seu crescimento no mercado, conforme pode ser visto na Fig. (4).

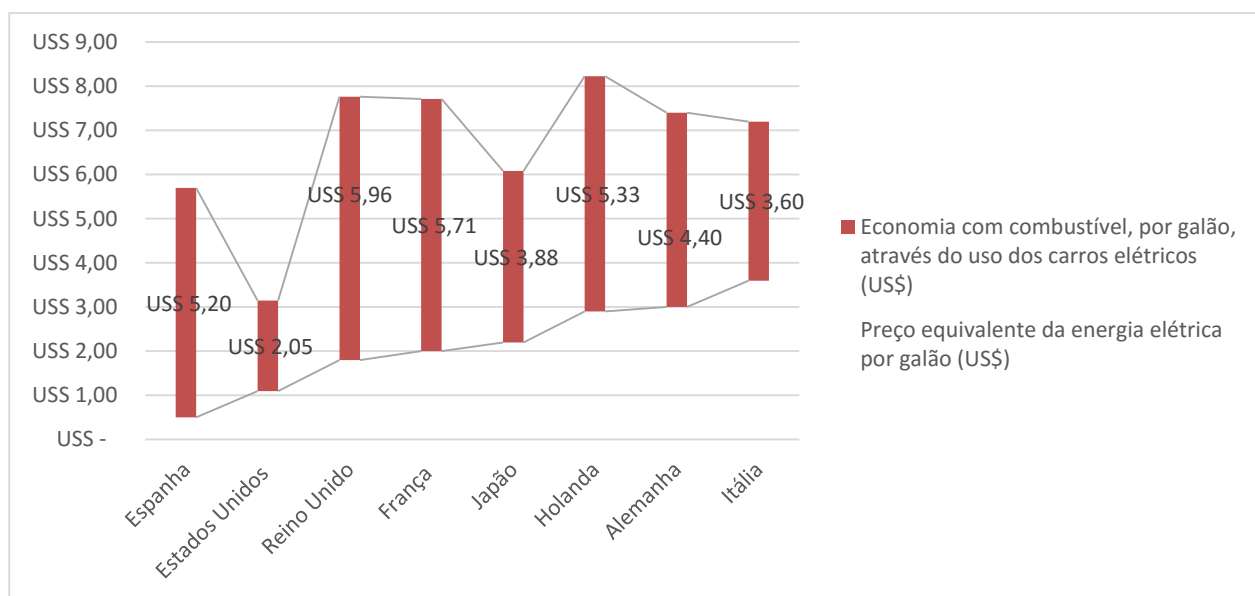


Figura 4. Comparação do preço da gasolina com energia elétrica

Fonte: Kagan, 2013 (adaptado).

No Brasil, de acordo com a Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores – ANFAVEA, o número de veículos elétricos licenciados teve um aumento 194%, de 117 unidades em 2012 para 344 unidades em 2013. No entanto, a principal barreira técnica para a disseminação em larga escala do VE está associada com a tecnologia das baterias. A capacidade da bateria limita a autonomia do veículo, apesar da tecnologia atual este limite não representa um problema nas áreas urbanas, onde os trajetos diários, em geral são inferiores a 100 km, sendo a média algo da ordem de 54

km (Peres, 2011). Na Figura (5) podemos comparar as vantagens e desvantagens dos VE's em relação aos veículos de combustão interna.

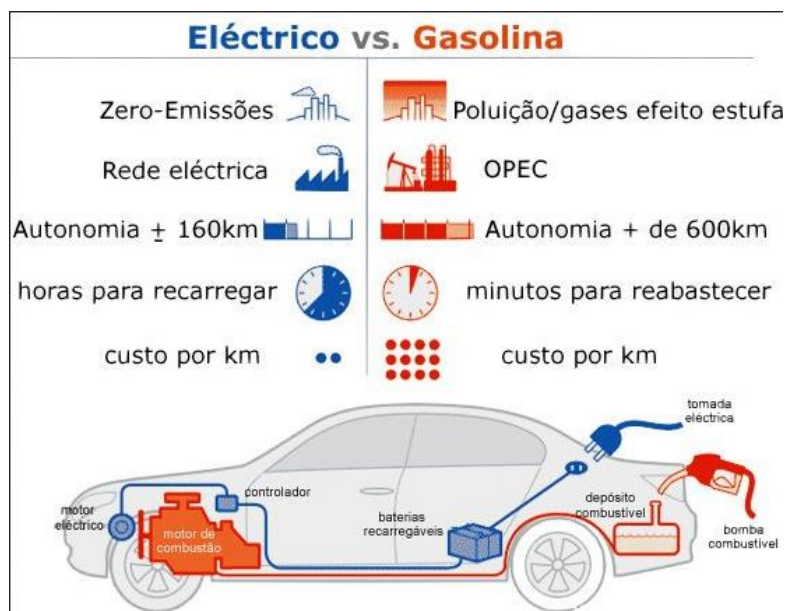


Figura 5. Comparação de um veículo elétrico e a combustão

Fonte: Kagan, 2013.

Com a introdução significativa dos VE's na malha de transportes urbanos haverá uma mudança não só em questões ambientais e sociais, mas também na logística de um setor complexo como é o setor elétrico brasileiro de geração, distribuição e abastecimento de energia.

2.1.1 Características dos veículos elétricos

Veículos elétricos são caracterizados como aqueles cuja propulsão dá-se por meio de um motor elétrico (Valle, 2015). Eles podem ser classificados de acordo com a fonte de energia elétrica que abastece o motor e de acordo com o arranjo dos componentes do sistema de tração elétrica. As categorias são: veículos elétricos a bateria, veículo elétrico híbrido, veículo elétrico híbrido plugável, veículo elétrico de célula a combustível, trólebus e veículo solar (Kagan, 2013).

Os motores elétricos apresentam usualmente as características de velocidade-torque próximas do ideal quando possuem um bom controle de ajuste de velocidade.

Geralmente, o motor elétrico começa com velocidade zero como pode ser visto na Fig. (6). A velocidade aumenta até a velocidade de base, a tensão aumenta até o seu valor nominal, enquanto o fluxo mantém constante. Na faixa de velocidade de zero até a base, o motor produz torque constante. Além da velocidade de base, o motor tem uma potência constante. Em baixas velocidades de operação, a fonte de tensão aumenta para o motor com o aumento da velocidade através do conversor eletrônico, enquanto o fluxo é mantido constante. No ponto da velocidade base, a tensão do motor atinge a tensão da fonte. Depois da velocidade base, a tensão do motor é mantida constante e o fluxo é enfraquecido, caindo hiperbolicamente com o aumento da velocidade. O resultado é uma constante potência de saída enquanto o torque declina hiperbolicamente com a velocidade (Ehsani, 2007).

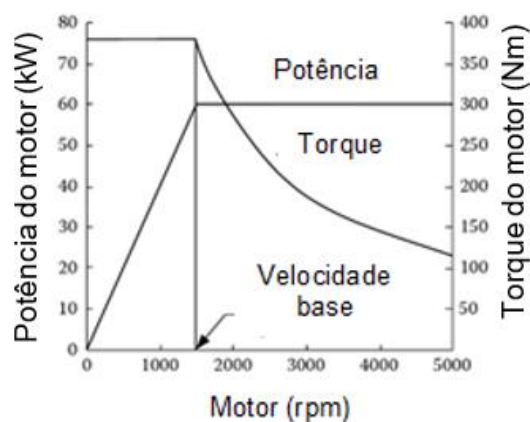


Figura 6. Característica velocidade-torque do motor elétrico

Fonte: Ehsani, 2007 (adaptado).

Nas próximas seções, serão apresentados alguns critérios imprescindíveis para estabelecer estratégias de carregamento desses veículos.

2.1.2 Tipos de veículos elétricos

Nesse trabalho só iremos abordar os veículos que podem ser abastecidos pela conexão com a RE.

2.1.2.1 Veículos elétricos a bateria

Os veículos elétricos a bateria são aqueles que possuem um motor elétrico para propulsão que obtêm energia a partir de um controlador, o qual regula a quantidade de energia fornecida pelo uso de um pedal acelerador acionado pelo motorista, como pode ser vista na Fig. (7). A energia utilizada pelos sistemas auxiliares do veículo e pelo motor procede da energia química armazenada em baterias instaladas no próprio veículo. A recarga dessas baterias pode ser feita por meio da energia externa convencional fornecida pela rede elétrica (hidráulica) ou por meio de energias alternativas como a eólica e solar.

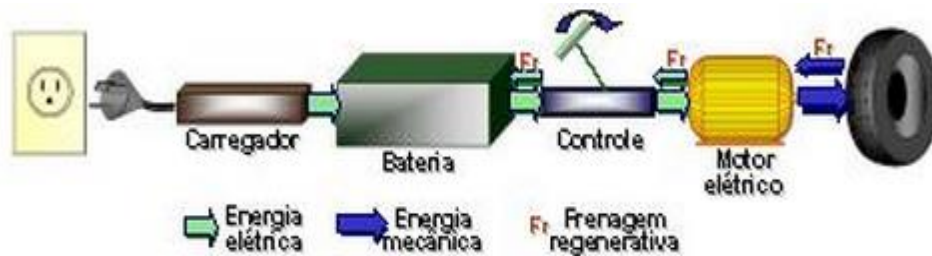


Figura 7. Esquema do funcionamento do veículo elétrico a bateria

Fonte: ABVE, 2013.

Além disso, os veículos mais modernos utilizam a **frenagem regenerativa** para obter energia e armazená-la nas baterias. Isso ocorre porque quando o motorista pisa no freio para reduzir a velocidade do veículo elétrico, os motores elétricos de tração são chaveados para atuar como **geradores de eletricidade** acionados pelas rodas ou eixos das rodas. (Kagan, 2013).

2.1.2.2 Veículo elétrico híbrido plugável

Esse tipo de veículo é considerado a forma mais eficiente e moderna de veículo híbrido, pois a bateria pode ser recarregada por meio de uma conexão com uma tomada da mesma forma que um veículo elétrico a bateria. Com isso, há uma redução da utilização de combustível fóssil e, conseqüentemente, as emissões de gases quando comparado com o híbrido não plugável. O funcionamento desse tipo de veículo é por meio do motor elétrico até que a bateria atinja uma determinada porcentagem de carga ou quando é necessário maior aceleração, nesse momento, o motor a combustão é acionado.

Para melhorar a autonomia do VE, os ultracapacitores são a aposta de armazenamento de veículos elétricos híbridos por contarem com uma alta energia específica, alta eficiência, excelente faixa de temperatura de operação e longa vida útil. Eles devem ser alocados em paralelo com banco de baterias devido a limitada potência, como mostra a Fig. (10) (Ehsani, 2007).

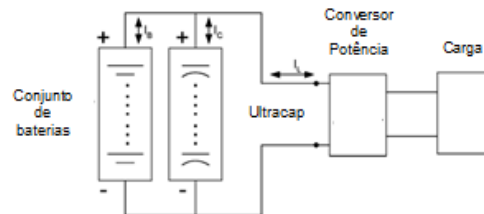


Figura 10. Conexão do banco de baterias com o banco de ultracapacitores

Fonte: Ehsani, 2007 (adaptado).

2.1.3 Comportamento do motorista

Um parâmetro importante para ser analisado é o comportamento do motorista. Isso permite saber qual é a quantidade de energia que será necessária para abastecer um veículo durante determinado período de tempo.

Uma estratégia para essa análise é considerar os ciclos de carga e descarga semanalmente, com diferentes padrões de comportamento de usuário durante a semana e os finais de semana. Essa diferença entre os usuários permite comparação do consumo da energia durante a semana.

De acordo com Yoshimi (2011), o VE pode ser considerado em três estados:

- Estacionados em casa: disponível para carregamento e descarregamento;
- Em movimento: somente consumindo a energia anteriormente armazenada;
- Estacionados fora de casa: pode fornecer e/ou consumir energia de acordo com a RE.

Na figura (11) podemos verificar exemplos de padrões de comportamento dos usuários.

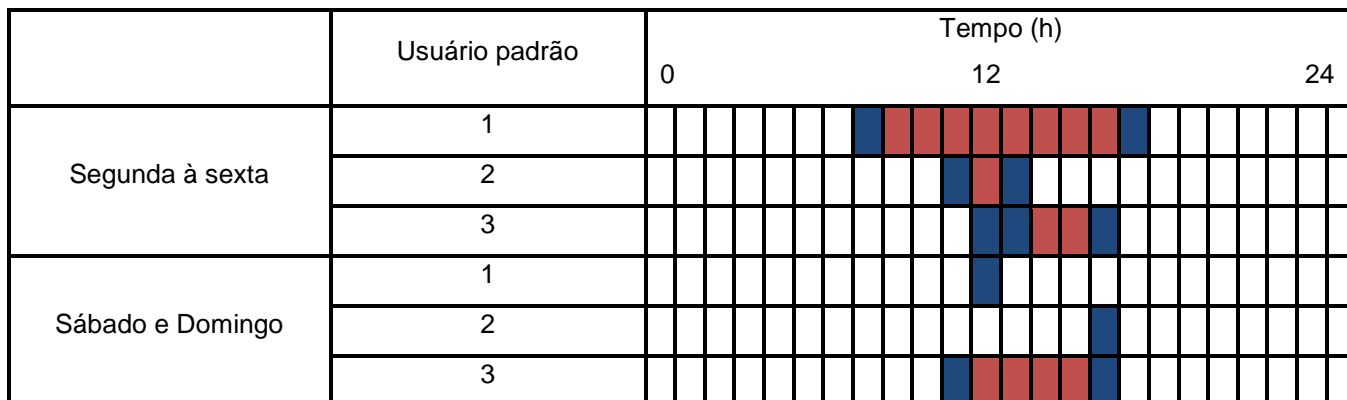


Figura 11. Padrões de comportamento do usuário

Fonte: Yoshimi, 2011 (Adaptado).

Dessa forma, podemos examinar o comportamento de padrões de usuários distintos para aumentar a confiabilidade dos resultados de consumo energético, visto que quando tratamos do comportamento de um único usuário fica mais difícil a verificação desses resultados. Entretanto, de acordo com Valle (2015), veículos pessoais ficam 4% do tempo para transporte, permanecendo 96% do tempo estacionado podendo servir para outras funções. Então, nesse trabalho será analisado o perfil do consumo energético do usuário padrão 1 para fins de estabelecer estratégia de carregamento quando o VE estiver estacionado fora de casa.

Sendo assim temos que durante a semana, o usuário 1 basicamente usa o veículo para ir ao trabalho ou escola pela manhã, deixando o veículo em estacionamento público durante a maior parte do dia. Retornando para a residência no final do dia. Aos sábados e domingos, o veículo permanece na residência durante a maior parte do dia, somente utilizando por um curto período.

O usuário 2 deixa o veículo estacionado a maior parte do tempo na residência, utilizando somente duas horas no dia, aproximadamente. Nos finais de semana, também permanece estacionado na residência a maioria do tempo.

O usuário 3, durante a semana, utiliza o veículo em média 3 horas por dia, mantendo-o na residência o tempo restante. Entretanto, nos finais de semana, o veículo

é utilizado durante aproximadamente duas horas e estacionado fora da residência por um período de 4 horas, diferentemente dos usuários anteriores, esse apresenta uma maior taxa de uso do veículo durante os finais de semana.

2.1.4 Tipos de carregamento

Para o processo de recarga das baterias deve-se definir a capacidade da bateria associada ao VE, determinar o ponto específico e definir o tempo de conexão de cada bateria ou VE à rede elétrica. Além disso, dependendo do tipo de carregamento, os consumidores podem ser estimulados a carregar seus próprios veículos fora do horário de pico associando essa mudança de hábito a preços diferenciados de custo de energia (Zamora, 2013).

Atualmente existem 3 métodos mais comuns de carregamento: carregamento normal, carregamento rápido e troca das baterias. Para o carregamento normal é considerado que as baterias serão totalmente carregadas com a corrente nominal dentro de um período de 5 a 8 horas. Para o carregamento rápido, são utilizadas altas correntes para carregar 80 a 90% das baterias em aproximadamente 20 a 30 minutos. No caso do método de troca das baterias, um conjunto de baterias totalmente carregadas é substituído pelas baterias descarregadas, podendo ser realizada em 10 minutos.

Cada método requer uma infraestrutura de carregamento diferente que serão apresentados na Tab. (1).

Tabela 1. Modos de carregamento e infraestrutura requerida

Modo de carregamento	Planejamento	Construção	Operação
Normal		Estrutura de carregamento em áreas residenciais, prédios e estacionamentos públicos.	O carregamento é feito pelo usuário. Tempo de carregamento: 8hs
Rápido	Dimensionamento do posto elétrico; Planejamento urbano e energético.	Usual em subestação de 10kV; necessita de uma área específica separada. Exemplo: eletroposto solar fotovoltaico.	O carregamento é feito por um profissional. Necessita de um sistema inteligente de gerenciamento de carga. Tempo de carregamento: 30min
Troca de Baterias		Distribuição baseada nas características de funcionamento de um tipo particular de veículo. Necessita de uma área específica.	A troca das baterias é feita por profissionais com auxílio de uma máquina especializada. Tempo de carregamento: 10min

Algumas dessas estratégias de carregamento já são feitas por algumas empresas que comercializam VE's. A *Better Place*, por exemplo, junto com a venda do veículo promove a contratação de um plano que dá direito ao cliente utilizar serviços de redes de abastecimento autorizadas mediante o pagamento de um valor mensal de acordo com o

número de trocas realizadas ao longo do mês. A bateria seria comercializada como um telefone celular em um plano de telefonia móvel. A diferença é que os consumidores comprarão uma quantidade mensal de quilômetros, em vez de minutos de ligação telefônica. Em janeiro de 2008, a *Better Place* anunciou uma parceria com o consórcio *Renault-Nissan* para a formação do primeiro operador de rede de recarga elétrica em Israel. (Peres, 2011)

Em Lisboa, a *Renault* montou uma rede de postos de atendimento rápido para atender o consumidor, além de criar uma rede de atendimento onde o motorista leva o carro com a bateria descarregada e a substitui por uma carregada, evitando perda de tempo com o reabastecimento e resolvendo o problema de autonomia (Webmotors, 2012).

2.1.5 Vehicle-to-grid (V2G)

Quando os usuários conectam os veículos elétricos na rede, o mesmo inicia o processo de carregamento das baterias, chamado modo rede para veículo (G2V). Por outro lado, os VE's podem funcionar como uma fonte de energia suplementar em horários adequados e até mesmo como sistema *back up* em caso de falhas no fornecimento regular de energia elétrica pela rede de distribuição (Xin Li, 2009). Nesse caso, quando o veículo fornece energia para a rede, o sistema opera no modo veículo para rede (V2G), como mostra a Fig. (12).

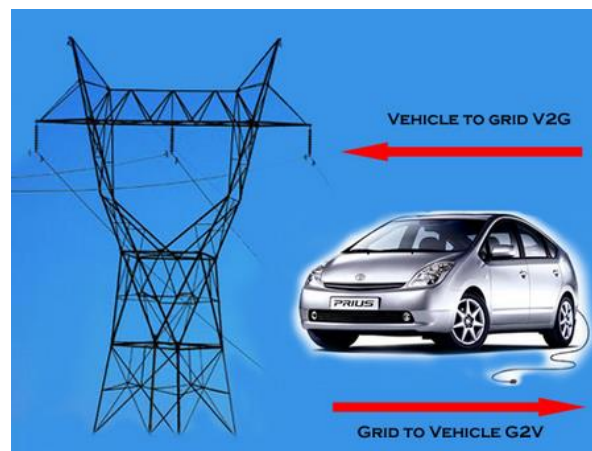


Figura 12. Modo de operação (G2V) e (V2G)

Fonte: Global Green House Warning.

A energia V2G de um veículo depende de três fatores: da capacidade de conduzir corrente e circuitos conectados ao veículo através da rede; da energia armazenada no veículo dividida pelo tempo de uso; e da potência máxima nominal da eletrônica de potência do veículo. Quando os limites desses três parâmetros forem os mais baixos, isso implica em uma capacidade máxima de energia no modo V2G (Kempton, 2004).

Os VE's vêm sendo uma alternativa para atender o pico na curva de carga, que dura em média de 3 a 5 horas por dia, devido a sua rápida resposta quando solicitado sua energia armazenada. Entretanto, para cargas básicas, entraves no preço do kWh e a limitada capacidade de armazenamento *on-board* dificultam ainda adotá-los nessa função. Todavia, isso poderia ser contornado se a energia fosse proveniente de uma série de veículos elétricos localizados em um estacionamento, por exemplo (Kempton, 2004).

Outra função estudada para os veículos elétricos é como *spinning reserves*. Isso refere-se à capacidade de energia adicional que pode ser gerada rapidamente, dentro de 10 minutos sob requisito do operador da rede. Pela regra, *spinning reserves* devem ser pagos pela disponibilidade e pela capacidade de entregarem uma dada potência quando solicitadas. Nesse caso, os veículos elétricos poderiam ser pagos para ficarem plugados disponíveis na rede sendo submetidos a curtos período de geração ao invés do uso de geradores. Os contratos de *spinning reserves* são feitos de forma que os fornecedores de energia sejam acionados até 20 vezes por ano com duração máxima de 1h. Isso dá vantagem ao veículo elétrico híbrido visto que esse apresenta maior capacidade de energia armazenada e reabastecimento mais rápido que os veículos elétricos puramente a bateria (Kempton, 2004).

O consumo mensal de um VE equivale ao consumo de um domicílio, com isso, as concessionárias de energia elétrica precisam de metodologias e aplicativos computacionais para auxílio ao gerenciamento de rede e verificação dos parâmetros de carregamento. Adicionalmente a isso, nas redes de distribuição, o impacto da incorporação do VE's pode ser determinado por meio do diagnóstico dos elementos de rede e o acompanhamento sistemático do carregamento nos alimentadores de distribuição e redes secundárias, verificar os valores de perfil de tensão, desequilíbrio de tensão e perdas. (Zamora, 2013)

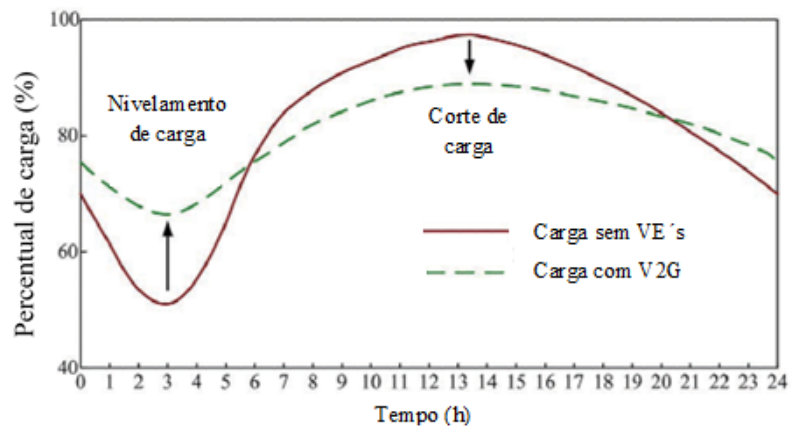


Figura 13. Impacto do V2G na carga da rede elétrica

Fonte: Kempton, 2000. (adaptado)

Na Fig. (13) é possível ver que fora do horário de pico a noite, o VE funciona como carga, absorvendo energia da RE, por isso que aumenta o nível da carga, enquanto que durante os horários de pico, os VE's podem descarregar a energia, armazenada anteriormente nas baterias, na RE para diminuir o pico de carga.

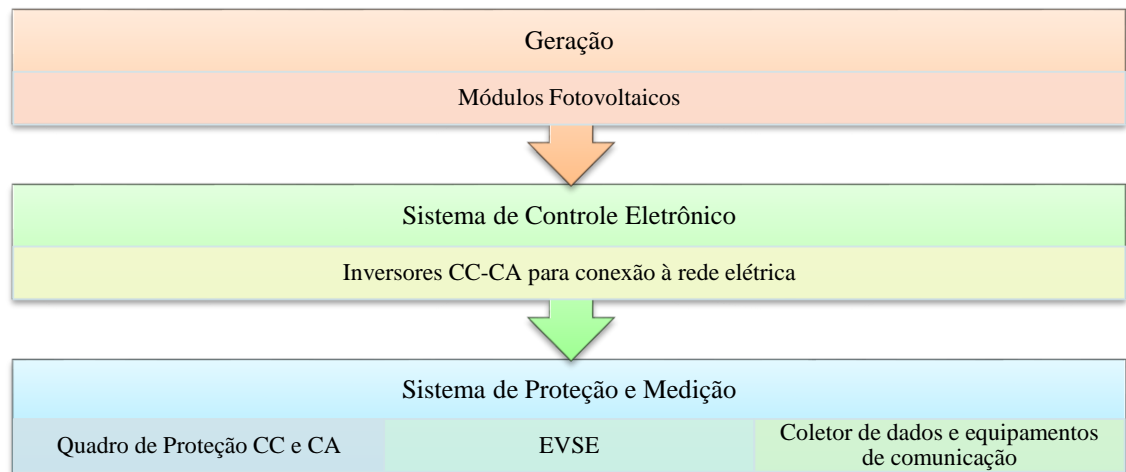
2.2 ELETROPOSTO SOLAR FOTOVOLTAICO

Neste trabalho a fim de atender a demanda energética do veículo será dimensionado e especificado um sistema de microgeração solar fotovoltaica conectado à RE.

Para realizar o dimensionamento desse sistema é necessário identificar os componentes, bem como parâmetros para especificação de cada um deles com as particularidades associadas a esse tipo de sistema.

O Sistema Fotovoltaico conectado à rede elétrica opera paralelamente com a RE com o objetivo de atender o consumo local, visando reduzir o fornecimento de energia da concessionária e até mesmo suprindo-o totalmente (Villalva, 2012).

O sistema será composto de um conjunto de módulos fotovoltaicos, um inversor especial para conexão à rede, quadros elétricos, um medidor de energia e um carregador externo. O quadro esquemático pode ser ilustrado na Fig. (14).



*EVSE – *the electric vehicle supply equipment*, este é o equipamento responsável pelo suprimento de energia para os veículos elétricos.

Figura 14. Blocos funcionais do SFV integrado com a rede elétrica

No Brasil, a principal situação da GD é a eletricidade obtida dos módulos fotovoltaicos ser consumida no próprio local e o excedente, se houver, exportado para a concessionária, gerando créditos que podem ser descontados da conta de energia elétrica.

Nas próximas seções serão abordadas as características e particularidades dos componentes dos sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica.

2.2.1 Módulos fotovoltaicos

Um módulo fotovoltaico é constituído de um conjunto de células montadas sobre uma estrutura rígida conectadas eletricamente. Os terminais superiores de uma célula são ligados ao terminal inferior da outra e assim sucessivamente, até formar um conjunto com a tensão de saída desejada.

O valor da tensão e da corrente nos terminais do módulo fotovoltaico depende do que está conectado em seus terminais. No caso de conexão com uma carga que demanda muita corrente, a tensão de saída tenderá a diminuir. Seguindo o mesmo raciocínio, temos que uma carga que demanda pouca corrente, a tensão do módulo será mais elevada, tendendo a tensão de circuito aberto.

Alguns parâmetros importantes para o dimensionamento dos módulos fotovoltaicos de acordo com o Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos são:

- *Área disponível para instalação dos módulos fotovoltaicos;*
- *Radiação solar global no plano do módulo;*
- *Perdas causadas por componentes adicionais, como o inversor, por exemplo.*

Villalva (2012) ainda acrescenta algumas características elétricas em STC (*Standard Test Conditions*) que são importantes serem analisadas na folha de dados do módulo fotovoltaico, são elas:

- *Tensão de circuito aberto (V_{OC})* – Esta é a máxima tensão que o módulo pode fornecer. A tensão e a temperatura tem uma proporção de relação inversa, de modo que em temperaturas mais baixas as tensões ficam maiores e em temperaturas mais altas as tensões são menores.
- *Corrente de curto-circuito (I_{SC})* – É a corrente máxima que o módulo alcança. Essa corrente varia proporcionalmente com a irradiância.
- *Eficiência de conversão do módulo (η)* – No Brasil, a eficiência dos módulos fotovoltaicos são avaliados e certificados pelo INMETRO através de seus laboratórios de eficiência.
- *Tensão de máxima potência (V_{MP})*
- *Corrente de máxima potência (I_{MP})*
- *Potência de pico ou potência máxima (P_{MP})*

Além dessas características, o modo de fazer a conexão entre os módulos e a orientação dos mesmos deve ser considerado para o projeto de instalação do eletroposto solar fotovoltaico.

2.2.1.1 Conexão dos módulos

Os módulos podem ser conectados em série e/ou paralelo. Quando os módulos são conectados em série, a tensão de saída do conjunto corresponde à soma da tensão fornecida por cada um dos módulos. Entretanto a corrente que circula pelo conjunto é a mesma, como mostra a Fig. (15).

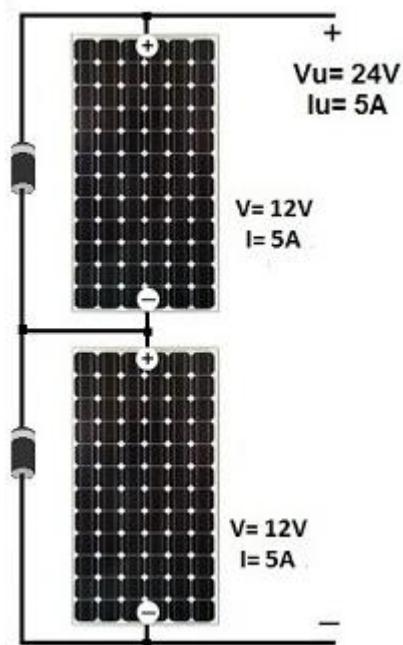


Figura 15. Conexão dos módulos em série

Na conexão em série, os módulos dependem um dos outros para produzir corrente. Então, quando há uma sombra em um módulo causado por algum obstáculo, a corrente elétrica é interrompida. Para minimizar esse efeito, são utilizados diodos *by-pass* em paralelo com os módulos fazendo um desvio da corrente elétrica produzida pelos outros módulos (Villalva, 2012).

Já na conexão em paralelo, a tensão de saída do conjunto é a mesma tensão fornecida por um módulo individual. Por outro lado, na Fig. (16) pode ser vista que a corrente fornecida pelo conjunto é a soma das correntes dos módulos do conjunto.

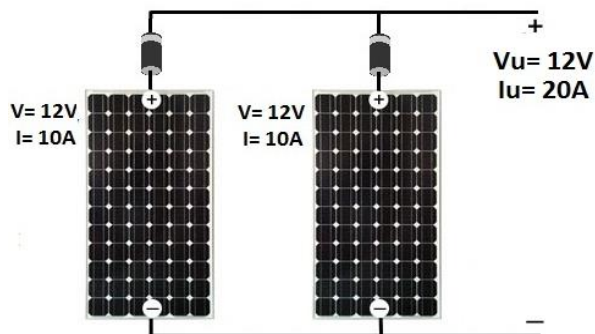


Figura 16. Conexão dos módulos em paralelo

2.2.1.2 Orientação dos módulos

Para que haja um melhor aproveitamento da radiação solar incidente é imprescindível estabelecer o ângulo de inclinação que serão colocados os módulos fotovoltaicos fixos.

Devido aos movimentos de rotação e translação da terra, a disponibilidade de radiação solar sobre a superfície terrestre depende da latitude local e da posição no tempo. É possível definir para uma determinada latitude geográfica um ângulo de inclinação que possibilite uma boa produção média de energia ao longo do ano (Villalva, 2012).

Na Tabela. (2) são mostrados os ângulos de inclinação recomendado para diversas faixas de latitude geográfica.

Tabela 2. Escolha do ângulo de inclinação do módulo

Latitude geográfica do local	Ângulo de inclinação recomendado
0° a 10°	$\alpha = 10^\circ$
11° a 20°	$\alpha = \text{latitude}$
21° a 30°	$\alpha = \text{latitude} + 5^\circ$
31° a 40°	$\alpha = \text{latitude} + 10^\circ$
41° ou mais	$\alpha = \text{latitude} + 15^\circ$

Fonte: Villalva, 2012.

Pode-se observar na Tab. (3) que o ângulo mínimo recomendado é de 10°, isso ocorre para evitar acúmulo de poeira sobre os módulos de tal modo que não comprometa sua eficiência (Villalva, 2012).

Além dos módulos fixos, há também aqueles com rastreamento automático da posição do Sol que são utilizados para aperfeiçoar o ângulo de incidência dos raios solares automaticamente ao longo do dia e dos meses da estação. Entretanto, apesar de serem mais eficientes do ponto de vista de geração energética que os módulos fixos, esse sistema tem um custo mais elevado e solicita manutenção das partes mecânicas e dos sistemas eletrônicos de controle.

2.2.2 Inversores

O inversor ou *Power Conditioning Unit* (PCU) usa um mecanismo de chaveamento para converter em corrente alternada a corrente contínua coletada pelos módulos fotovoltaicos.

Existem, basicamente, dois tipos de inversores: os comutados pela rede (comutação natural), como mostra a Fig. (17), e os auto-comutadores (comutação forçada). No primeiro, o processo de inversão é controlado pela tensão da rede elétrica e no auto comutado o controle é realizado pelo próprio inversor. O inversor conectado à rede elétrica funciona somente quando conectado à rede, tendo em casos de falha do fornecimento de eletricidade da concessionária de energia a interrupção do funcionamento desse equipamento.



Figura 17. Inversor para a conexão de módulos fotovoltaicos à rede elétrica

Fonte: Santerno, 2014.

Os inversores para o eletroposto solar conectados à rede elétrica podem possuir ou não um transformador de isolação tornando o sistema mais seguro. A presença de transformador permite a isolação completa entre o lado CC (módulos fotovoltaicos) e o lado CA (rede elétrica), impedindo a circulação de correntes de fuga entre os módulos e a rede e oferecendo segurança adicional em caso de falha de equipamentos, curto-circuito e mesmo na ocorrência de transientes de rede elétrica que podem afetar os inversores (Villalva, 2012).

Os principais parâmetros para o dimensionamento do inversor conectados à rede são:

- *Faixa útil de tensão contínua na entrada*

É o intervalo de valores de tensão de entrada no qual o inversor consegue operar, além de fornecer a faixa de tensão na qual o sistema de MPPT do inversor consegue maximizar a produção de energia dos módulos fotovoltaicos.

- *Tensão contínua máxima na entrada*

É o valor máximo absoluto da tensão admissível na entrada do inversor, o que limita o número de módulos que podem ser colocados em série.

- *Número máximo de strings na entrada*

Os inversores comerciais possuem limitado número de entradas para *strings* dependendo do seu modelo.

- *Número de entradas independentes com MPPT*

Todos os inversores para a conexão à rede possuem MPPT, o que significa que estão preparados para maximizar a potência fornecida pelos módulos fotovoltaicos, fazendo-os operar constantemente em seu ponto de máxima potência, independente das condições que afetam o desempenho e alteram a curva característica de corrente e tensão do conjunto de módulos (Villalva, 2012).

- *Potência de corrente contínua na entrada*

Este valor indica a potência de pico do conjunto fotovoltaico que pode ser ligado a esse inversor.

- *Potência de corrente alternada na saída*

É a máxima potência que o inversor pode injetar na rede elétrica.

- *Rendimento*

O valor do rendimento quantifica a energia que o equipamento desperdiça durante o seu funcionamento. Quanto maior o rendimento, melhor é o aproveitamento da energia extraída dos módulos fotovoltaicos.

- *Tensão de operação na conexão com a rede*

- *Frequência da rede elétrica*

Em geral, para sistemas de microgeração, os inversores monofásicos são adequados quando se trata de baixa potência (até 5 kW), ao passo que os trifásicos são utilizados em potência acima de 5 kW.

Todo inversor deve ser dimensionado com uma folga de potência (10 a 20%) para aumentar a confiabilidade e a vida útil.

2.2.3 EVSE – Equipamento de suprimento dos veículos elétricos

As baterias de um VE podem ser carregadas por dois métodos: recarga indutiva e recarga condutiva. A primeira necessita de uma estação de carga onde uma bobina é utilizada para criar o fluxo magnético alternado que induz corrente em uma segunda bobina embarcada no dispositivo a ser carregado. A recarga condutiva é feita por meio do contato físico, podendo ser realizadas em tomadas padrões ou em estações de recarga.



Figura 18. Recarga condutiva residencial

Fonte: Nissan, 2016.

Em geral, a recarga residencial é mais recomendável a PHEV visto que suas baterias são menores em relação aos BEV fazendo com que a autonomia dos veículos se reestabeleça em um tempo menor. No caso dos BEV em que a única fonte são as baterias é interessante pontos de recarga rápido para a mobilidade do usuário (Valle, 2015).

De acordo com a norma ABNT NBR 61851:2013, que especifica o carregamento condutivo para VE's, são definidos 4 modos de carga:

Tabela 3. Tipos de carga previsto pela norma

	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

Fonte: Valle, 2015.

Os modos 1 e 2 são carregamentos que tem duração em torno de 8 e 4 horas, respectivamente, podendo ser realizados na própria residência com o carregador próprio do veículo ou com auxílio de um conector. O modo 3 é o carregamento rápido que pode ser feito em até 30 minutos com um conector no próprio eletroposto solar fotovoltaico. O modo 4 pode carregar as baterias em até 10 minutos usando a modulação por largura de pulso (PMW) como método de comunicação entre a rede e o controlador de carga.



Figura 19. Conector SAE J1772

Fonte: Valle, 2015

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 CENÁRIO PROPOSTO

Devido aos impactos na rede com a incorporação dos VE's, o cenário proposto é a integração do VE com a rede de distribuição de energia por meio de eletroposto solar fotovoltaico. Dependendo da curva de radiação solar, da logística de carregamento das baterias do veículo, o VE pode ser caracterizado como carga ou fonte geradora de energia elétrica, conforme mostrado na Fig. (20).

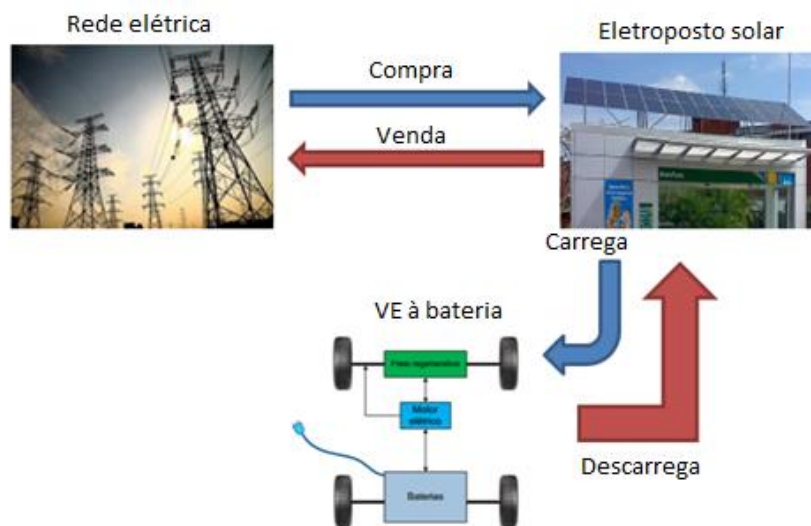


Figura 20. Fluxo de energia para cenário considerado

O fluxo de energia tanto entre a rede elétrica e o eletroposto solar quanto entre este último e o veículo elétrico é bidirecional. Nesse caso, o usuário tem a relação de compra e venda de energia com concessionária dependendo do perfil de consumo do usuário do veículo. Nessa situação ocorrem os modos V2G (veículo fornece energia para a rede) quanto o G2V (rede fornece energia para o veículo). (Kempton, 2004).

Para que o veículo seja considerado uma carga controlada é necessário que exista a comunicação com o operador de rede. Cada veículo elétrico deve conter: (1) uma conexão com a rede elétrica que viabilize o fluxo de energia; (2) controle ou lógica para conexão lógica necessária para a comunicação com o operador da rede; (3) controle e medidor no veículo (Kempton, 2004).

3.2 ENERGIA CONSUMIDA PELO VE

Para quantificar a energia necessária para atender as necessidades dos usuários diariamente, foi escolhido o comportamento do usuário tipo 1, com informações da trajetória de um veículo convencional disponível para coletar os dados de velocidade, tempo, distância e altitude. Essas medições foram feitas a cada segundo para que fosse possível fazer uma análise das forças atuantes no veículo durante o trajeto. Os dados foram obtidos via monitoramento por GPS, além das próprias informações adquiridos por meio do portal ODB do veículo.



Figura 21. Veículo convencional utilizado: Chery S18

O veículo percorreu uma trajetória de aproximadamente 31km para chegar ao destino. Analisando a dinâmica do veículo durante a trajetória (Fig. (22)), pode-se verificar as forças atuantes que exerce impulsão ou resistência em sua locomoção. Pode-se notar que nessa trajetória, a altitude está aumentando, o que fará com que o veículo precise de mais energia para sair da inércia comparado com a energia necessária para o retorno ao ponto inicial.

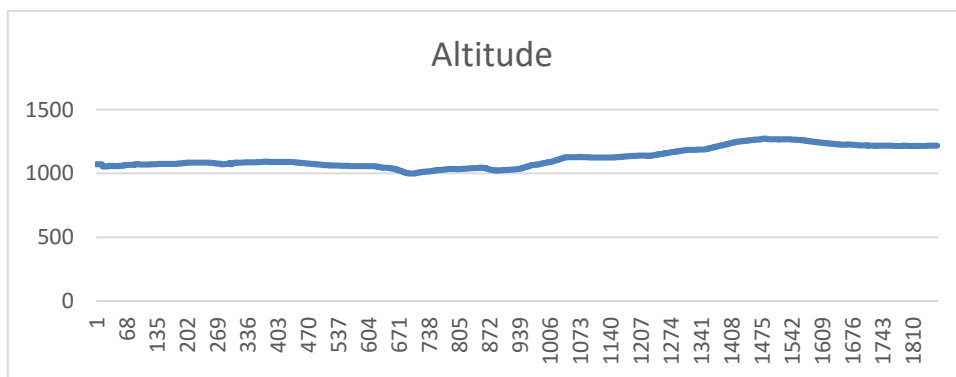


Figura 22. Trajetória do veículo

As forças de tração são as que impulsionam o veículo para frente (F_t). Ao passo que as forças de resistência são as que tentam fazer com que o veículo pare, engloba as forças de resistência de rolamento, o arrasto aerodinâmico, a resistência a subida. Na Fig.(23) mostra as forças atuantes no deslocamento do veículo na subida.

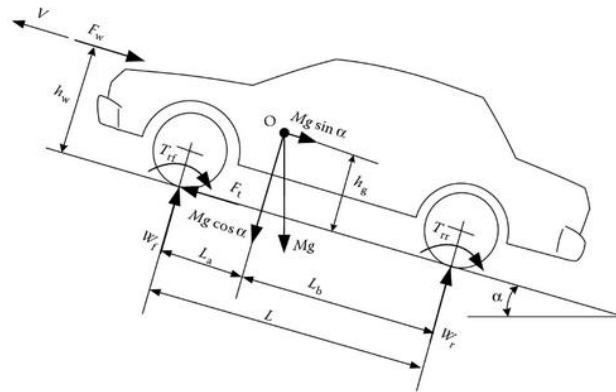


Figura 23. Forças atuantes na dinâmica do veículo na subida

Fonte: Ehsani, 2004.

Segundo a lei de Newton, tem-se:

$$\frac{dV}{dt} = \frac{\sum F_t - \sum F_r}{\delta M} \quad (1)$$

Tem-se que a equação dinâmica da movimentação do veículo da direção longitudinal será dada por:

$$F_r = M_v \frac{dV}{dt} = (F_{tf} + F_{tr}) - (F_{rf} + F_{rr} + F_w + F_g) \quad (2)$$

Em que:

M_v – é a massa do veículo (kg);

F_{tf} – é a tração dianteira (N);

F_{tr} – é a tração traseira (N);

F_{rf} – é a resistência dianteira (N);

F_{rr} – é a resistência traseira (N);

F_w – é a força de arrasto aerodinâmico (N);

F_g – é a força peso (N).

Sendo o primeiro termo da direita o total da força de tração e o segundo termo o total da força de resistência.

A força de arrasto aerodinâmico ocorre quando o veículo trafega a uma determinada velocidade no ar gerando uma força de resistência a sua locomoção, Fig. (24).

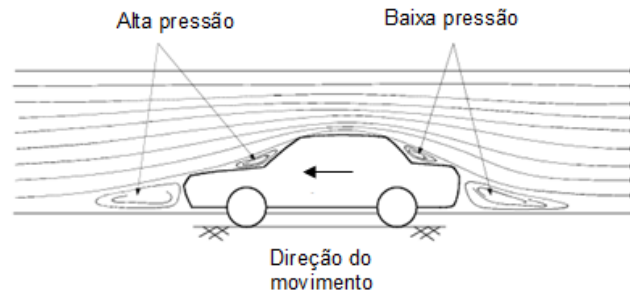


Figura 24. Força de arrasto na locomoção do veículo

Essa força está relacionada a velocidade (V), área frontal do veículo (A_f), formato do veículo e a densidade do ar. A força de arrasto aerodinâmico é encontrado por:

$$F_w = \frac{1}{2} \rho A_f C_D (V + V_w)^2 = \frac{1}{2} \rho A_f C_D (V_v)^2 \quad (3)$$

Em que:

C_D é o coeficiente de arrasto aerodinâmico de 0,383 (corpo de Ahmed);

V_v é a velocidade do veículo no instante t , medido pelo GPS;

A_f – é de aproximadamente 2,2622 m²; e

ρ – densidade do ar em Brasília de 1,225 kg/m³.

A outra força de resistência de interesse é a força de resistência da rodovia (F_{rd}) composta pela força de resistência ao rolamento dos pneus (F_f) e a força peso (F_g) dada por:

$$F_{rd} = F_f + F_g = M_v g (f_r \cos \alpha + \sin \alpha) \quad (4)$$

Em que:

f_r é o coeficiente de atrito ao rolamento;

α é o ângulo de inclinação da rodovia em relação com a horizontal.

Quando considerado uma variação de velocidade, temos que o fator de atrito é encontrado por:

$$f_r = 0.01 \left(\frac{v_v}{160} \right) \quad (5)$$

Quando o ângulo é muito pequeno, a equação (4) pode ser substituída por:

$$F_{rd} = F_f + F_g = M_v g \left(f_r + \frac{H}{L} \right) \quad (6)$$

Sendo M_v de 1028 kg, H a altitude do local e L o trecho percorrido pelo veículo.

Com isso, manipulando a equação (2), a força de tração será encontrada por:

$$F_t = M_v g f_r \cos \alpha + \frac{1}{2} \rho_A C_D A_f V^2 + M_v \frac{dv}{dt} \quad (7)$$

Assim, de posse dos resultados das forças, temos que a energia em cada instante para o usuário padrão 1 pode ser expressa como:

$$E = F_t \times d \quad (8)$$

Para obter o consumo total (E_t) durante o trajeto na ida será somada a energia consumida (E_c) e debitada a energia gerada pelo motor por meio da frenagem regenerativa (E_{fg}).

$$E_t = \frac{E_c - E_{fg}}{3600} \text{ (kWh)} \quad (9)$$

Na fig. (25) apresenta o perfil do consumo de energia total do veículo na ida que foi de 2,6kWh.

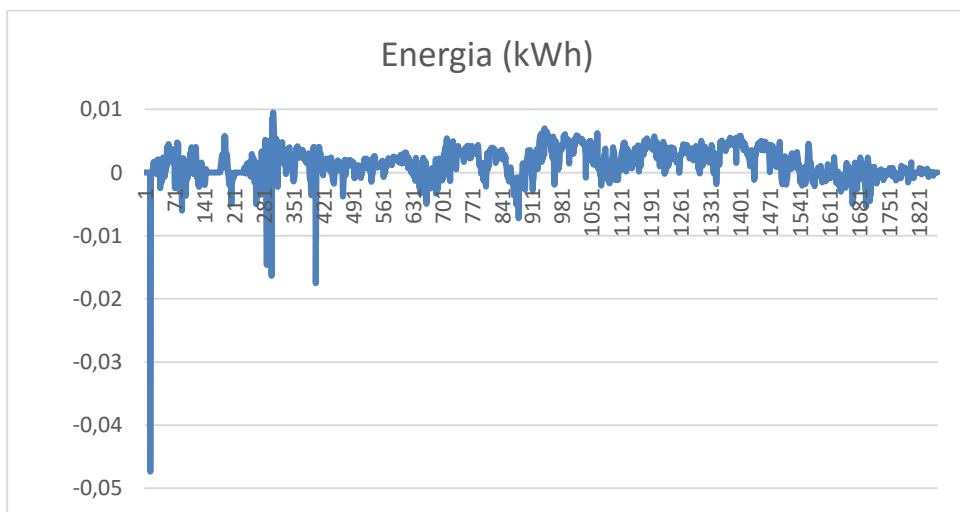


Figura 25. Perfil do consumo de energia na ida

Quando o veículo retorna ao ponto inicial, aplica-se as mesmas relações de força que anteriormente apresentadas para o trajeto de ida, com a diferença que com a descida, a força peso é considerada uma força de tração e não mais de resistência. Com isso, tem-se a energia total na trajetória de volta foi de 1,66kWh, sendo inferior ao da ida visto que a altitude na volta vai diminuindo, o que contribui para o deslocamento do veículo sem solicitar muito do motor, Fig. (26).

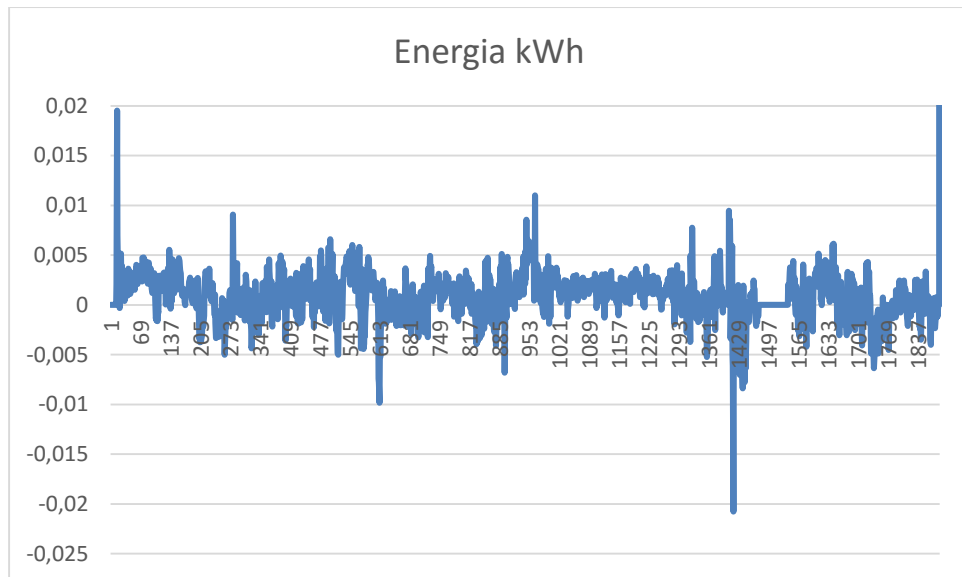


Figura 26. Perfil do consumo de energia na volta

O total de energia para uma trajetória de 62km foi de 4,26kWh.

Como a eficiência do motor varia com o ponto de operação velocidade-torque do motor (Fig. (27)), foi encontrada uma relação entre as velocidades rotacionais medidas no Chery S18 e do veículo elétrico por meio do ponto ótimo de operação do veículo elétrico, como mostrado na Fig. (28).

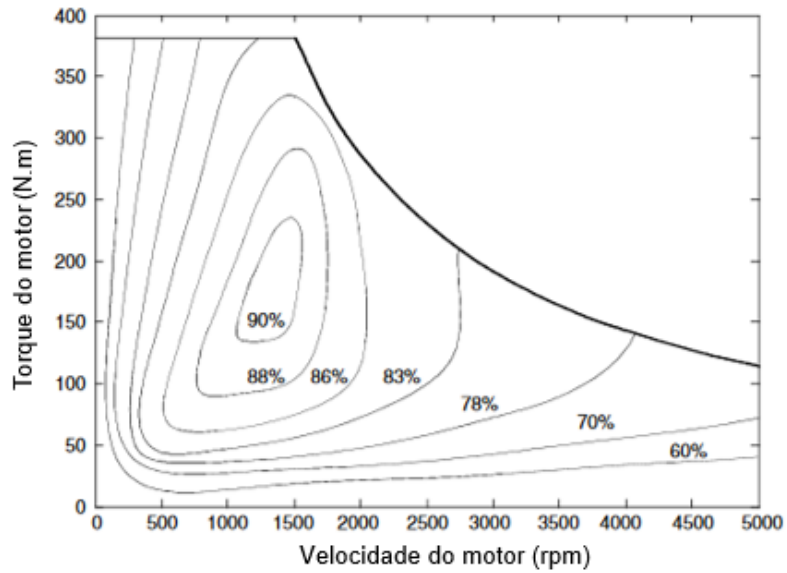


Figura 27. Características da eficiência em motores elétricos típicos

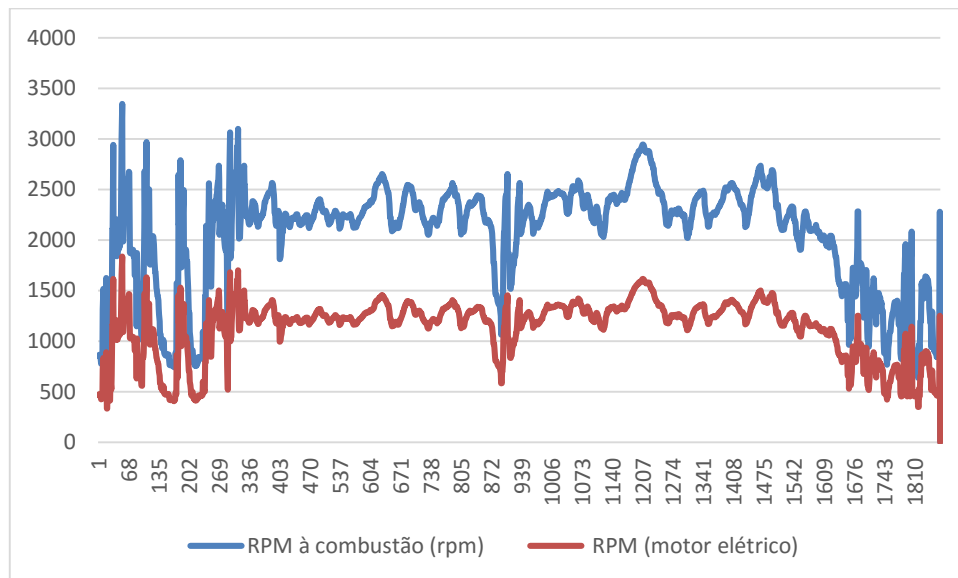


Figura 28. Relação RPM entre o motor à combustão e o motor elétrico

Como era previsto, a operação do veículo elétrico trabalhando sempre no ponto ótimo de operação (90% de eficiência) apresenta valores de RPM menores que medidos no Chery S18. Isso deve-se ao fato de que o motor elétrico apresenta uma resposta mais eficiente a variação de carga que é solicitada pelo usuário.

3.3 ELETROPOSTO

Considerando que o eletroposto será dimensionado na cidade de Brasília, que encontra-se em uma latitude de $15,7^{\circ}\text{S}$, o ângulo de inclinação será de 15° voltado para o norte, conforme mostra a representação feita na Fig. (29).

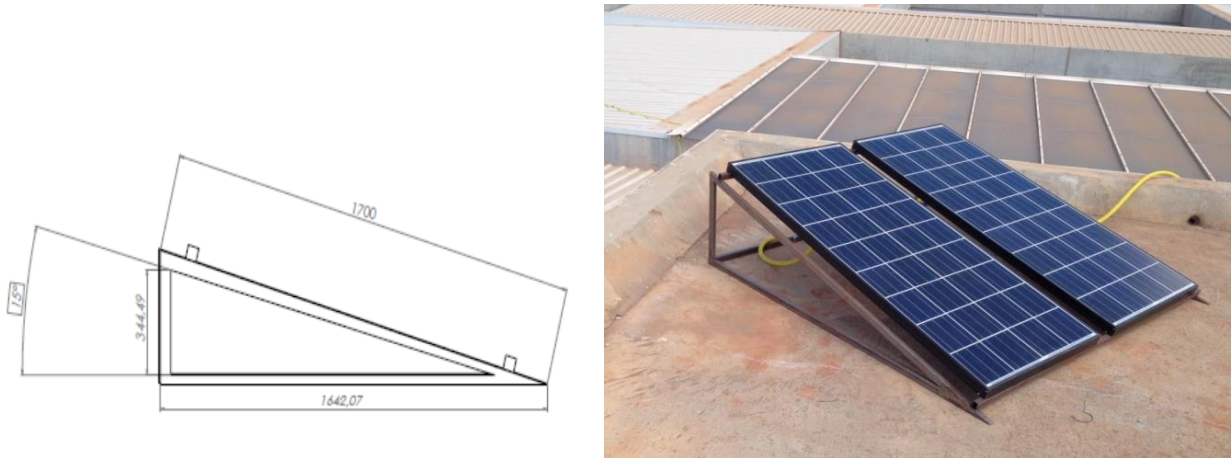


Figura 29. Inclinação dos módulos fotovoltaicos

Fonte: Perillo, 2013.

Sendo assim, a partir dos estudos realizados por Perillo (2013), utilizando como base o painel fotovoltaico da fabricante Jinko, tem-se as seguintes especificações elétricas:

Tabela 4. Especificações técnicas do painel fotovoltaico

JKM-275M-96 (275W)	
Eficiência do módulo (%)	16,14
Tensão de máxima potência (V)	51,9
Corrente de máxima potência (A)	5,3
Tensão de circuito aberto (V)	62,8
Corrente de curto-circuito (A)	5,84
Tipo de painel	monocristalino
Dimensões (mm x mm x mm)	1.575x1.082x45

Outro parâmetro importante de ser analisado para o dimensionamento é o recurso solar para Brasília – DF. Na Fig. (30) estão os dados de irradiação solar diária média para cada mês, destacando os meses com melhor e pior médias diárias em azul e vermelho, respectivamente.

Cálculo no Plano Inclinado

Estação: Brasília
Município: Brasília , DF - BRA
Latitude: 15,7° S
Longitude: 47,929722° O
Distância do ponto de ref. (15,7° S; 47,6° O) :35,3 km

#	Ângulo	Inclinação	Irradiação solar diária média mensal [kWh/m ² .dia]												Média	Delta
			Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez		
<input type="checkbox"/>	Plano Horizontal	0° N	4,67	5,58	4,53	5,00	4,72	4,75	4,97	5,50	5,25	4,69	4,75	4,72	4,93	1,05
<input checked="" type="checkbox"/>	Ângulo igual a latitude	16° N	4,35	5,35	4,56	5,39	5,42	5,67	5,86	6,14	5,43	4,57	4,45	4,35	5,13	1,79
<input type="checkbox"/>	Maior média anual	19° N	4,26	5,27	4,54	5,42	5,51	5,81	5,99	6,21	5,43	4,52	4,37	4,26	5,13	1,95
<input type="checkbox"/>	Maior mínimo mensal	6° N	4,57	5,53	4,57	5,18	5,02	5,13	5,34	5,78	5,35	4,67	4,66	4,61	5,04	1,21

Figura 30. Irradiação solar diária média para Brasília – DF

Fonte: Cresesb, 2016.

Na figura (31) podemos observar que as estações do ano não possuem expressiva influência nas irradiações para essa latitude, mantendo uma média de, aproximadamente, 5,13kWh/m².dia.

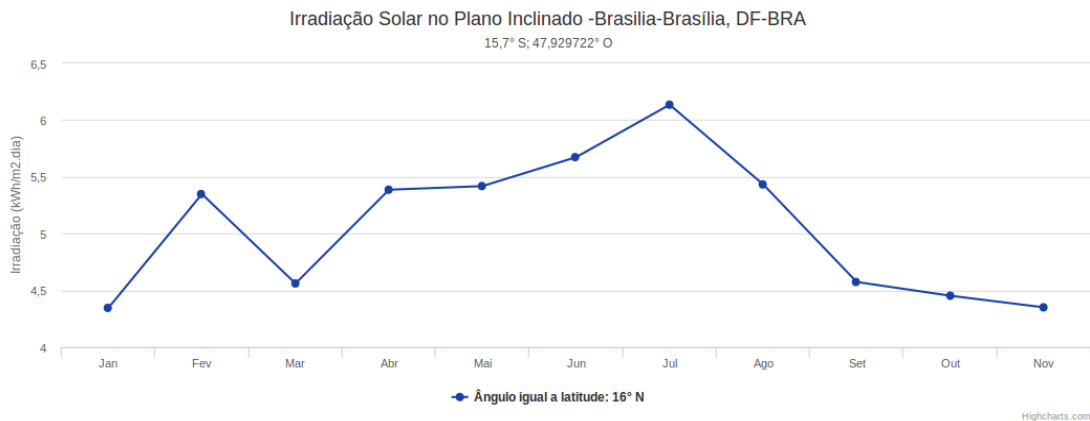


Figura 31. Irradiação diária em Brasília

Com isso temos que o cálculo da energia produzida considerando o valor de irradiação diária média com o plano inclinado será obtido por meio de:

$$E_p = E_s \times A_{mod} \times \eta_{mod} \quad (10)$$

Em que:

E_p – energia produzida pelo módulo diariamente [Wh];

E_s – insolação diária [Wh/m²/dia];

A_{mod} – área da superfície do módulo [m²];

η_{mod} – eficiência do módulo.

Sendo assim a energia produzida (E_p) por cada módulo será:

$$E_p = 5130 \times 1,704 \times 0,1614 = 1410,88 \text{ Wh} = 1,41 \text{ kWh}$$

Para encontrar o número de módulos necessários para atender a carga, foi selecionado um veículo elétrico à bateria, Nissan Leaf 2016, por ser um carro de porte semelhante ao do Chery S18. O Nissan Leaf 2016 pode ter um conjunto de baterias que fornece 24kWh ou 30kWh. Para este estudo, foi escolhido o de 24 kWh pois tem uma autonomia prevista de 117km, que é adequado para o trânsito urbano. Com isso, temos que o número de módulos (n_m) para atender a carga foi de:

$$n_m = \frac{E_c}{E_p} = \frac{24}{1,41} = 17,02 = 18 \text{ módulos} \quad (11)$$

Sendo: E_c a energia diária consumida pelo sistema.

Para descobrir a potência gerada por módulo, temos que de acordo com o mapa solarimétrico do Brasil mostrado na figura (32), temos que a insolação diária média para Brasília são de 6 horas/dia.

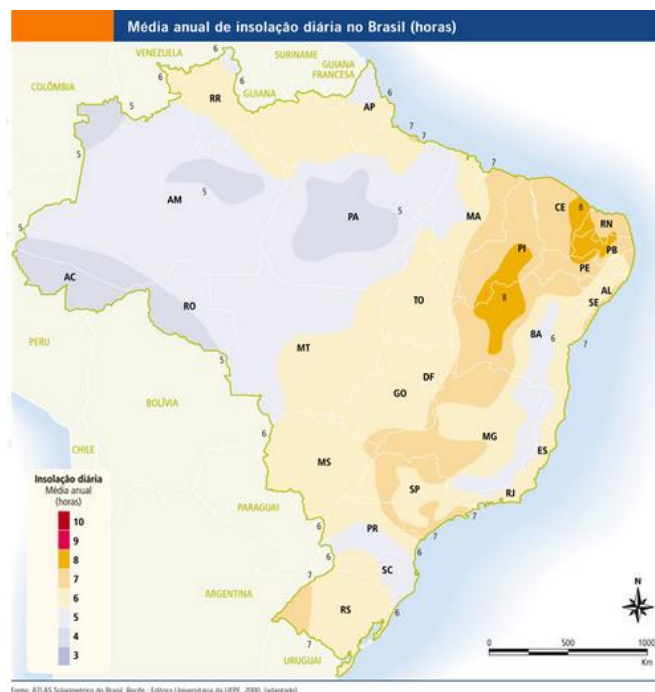


Figura 32. Mapa solarimétrico do Brasil

Fonte: UFPE, 2000.

A partir disso, a potência gerada (P_g) pelos módulos diariamente será:

$$P_g = \frac{E_p}{\text{Insolação}_{\text{horas}}} \times n_c \quad (12)$$

$$= \frac{1410.88}{6} \times 18 = 4,23 \text{ kW}$$

O inversor utilizado nesse sistema será de comutação natural, como citado anteriormente, com as seguintes especificações:

Tabela 5 – Especificação técnica do inversor.

M Plus 2600 E	
Tensão contínua máxima na entrada	600Vdc
Número máximo de <i>strings</i> na entrada com MPPT	4
Consumo de energia em <i>stand by</i>	8W
Potência de corrente contínua na entrada	2140 W
Potência de corrente alternada na saída	2210 W
Rendimento	94%
Tensão de operação na conexão com a rede	230 Vac +/-15%
Frequência da rede elétrica	50/60 Hz

De acordo com as características do inversor, temos que o número de módulos conectados em série e em paralelo são encontrados a partir das equações a seguir:

$$N_{\text{serie}} = \frac{V_{CC}(\text{entrada do inversor})}{V_{oc}(\text{módulos fotovoltaico})} = \frac{600}{62,8} = 9,55 = 9 \text{ módulos} \quad (13)$$

$$N_{paralelo} = \frac{P_{CC}(\text{entrada do inversor})}{P_{max}(\text{módulos fotovoltaico})} = \frac{2140}{275} = 7,78 = 7 \text{ módulos} \quad (14)$$

Para chegar aos valores de potência entregue por mês pelo sistema fotovoltaico, temos que:

$$P_{entregue\ mensal} = P_g \times n^\circ \text{ módulos} \times \eta_{inv} \times 30 \quad (15)$$

$$= 235,15 \times 18 \times 0,94 \times 30 = 119,36 \text{ kW/mês}$$

Como o usuário padrão considerado fica em torno de 8 horas conectado ao eletroposto solar, não há necessidade de banco de baterias externa no sistema fotovoltaico visto que durante a geração essa energia será despachada para o veículo ou para a rede elétrica. Além disso, devido o eletroposto solar funcionar como um posto de carregamento rápido, após o VE ser conectado no eletroposto ele pode despachar energia para a rede de acordo com a solicitação da mesma por meio do sistema de comunicação entre a rede e o controlador de carga.

Para encontrar a máxima potência do modo V2G que pode ser despachada pelo veículo para a rede, tem-se que:

$$P_{veiculo} = \frac{(E_s - \frac{d_d + d_{rb}}{\eta_{veh}})}{t_{disp}} \quad (16)$$

Em que:

$P_{veiculo}$ – potência máxima da V2G (kW);

E_s – energia armazenada disponível em DC para o inversor (kWh);

d_d – distância em milhas percorrida desde que a energia armazenada estava completa (depende do comportamento do motorista, tipo de veículo e da estratégia do motorista para ficar preparado na venda da energia);

d_{rb} – distância em milhas da faixa de buffer requerido pelo motorista (distância reservada para uma situação inesperada, como ir ao hospital)

t_{disp} – tempo que a energia armazenada é despachada em horas;

Com isso, temos que a potência despachada enquanto o veículo fica estacionado em área pública:

$$P_{veiculo} = \frac{(24 - \frac{20 - 9,32}{0,62})}{8} = 0,84677 \text{ kW} = 846,77W$$

3.4 CUSTOS

Os custos do eletroposto solar foram calculados de acordo com a quantidade de módulos fotovoltaicos e inversores utilizados, além do equipamento de suprimento de energia dos VE's e da mão de obra. Além disso, considerando que o custo da energia no eletroposto será de R\$ 1,40/ kWh, temos que o eletroposto se paga em 7 anos, gerando uma economia de R\$ 234.763,00 ao longo de 25 anos que é o período de vida útil das células fotovoltaicas.

Tabela 6. Análise econômica do eletroposto solar fotovoltaico

Potência entregue pelo eletroposto de 119,36kW/mês				
	Módulos fotovoltaicos JKM-275M-96 (275W)	Inversor M Plus 2600 E	EVSE	Instalação
Quantidade	18	1	1	1
Custo unitário	R\$ 1.209,00	R\$ 3.000,00	R\$336,00	R\$ 1,00/W
Custo total	R\$ 21.762,00	R\$ 3.000,00	R\$336,00	R\$ 3.976,20
Total investido	R\$ 29.074,20			
Economia acumulada em 25 anos	R\$ 234.763,00			
Payback	7 anos			

Considerando que a trajetória de ida e volta do Chery S18, é possível calcular os custos associados ao deslocamento caso o veículo fosse abastecido na residência, no eletroposto solar fotovoltaico ou em um posto de gasolina. Tendo que o preço da energia na residência é de R\$ 0,58 kW; de um eletroposto solar é de R\$ 1,40 kW; da gasolina R\$

3,62 por litro, os custos para a trajetória de aproximadamente 62km com o consumo de energia de 4,26kWh será:

Tabela 7. Custos comparativos

	Custo	Custo diário do percurso
Eletroposto Solar Fotovoltaico	R\$ 1,40/ kWh	R\$ 5,96
Energia Residencial	R\$ 0,58/ kWh	R\$ 2,47
Posto de gasolina	R\$ 3,62/ litro	R\$ 14,96

4. COMENTÁRIOS CONCLUSIVOS

Os resultados encontrados estão em consonância com os objetivos geral e específicos. O ciclo energético do veículo estudado apresentou consumo de energia total de 4,26kWh sendo no trajeto de ida a energia consumida maior que o de volta. Isso é importante salientar, porque no caso do veículo elétrico que durante a frenagem regenerativa geram energia para carregar as baterias, temos que no percurso em que a altitude está diminuindo, a quantidade de energia total consumida para uma mesma distância foi de até 1,5 vezes menor que a trajetória de ida. Adicionalmente, foi visto que para esse usuário padrão, a autonomia do veículo elétrico à bateria não é um fator limitante para o uso em áreas urbanas.

Com relação a energia que o veículo pode despachar para a rede elétrica, seja para diminuir o pico na curva de carga ou mesmo na função de *spinning reserve* é inviável nesse caso devido ao comportamento do usuário e a limitação do armazenamento de energia do VE. Isso pode ser melhor visto, quando se tratar de uma quantidade expressiva de veículos elétricos aglomerados em um mesmo local, estacionamento por exemplo. Assim, seria possível acionar essas unidades geradoras quando o operador de energia solicitasse, por meio de uma comunicação direta do operador com o estacionamento dos veículos.

No que diz respeito o eletroposto solar fotovoltaico, é visto que o tempo de carregamento impacta diretamente no custo da energia, ou seja, apesar da economia gerada pela energia elétrica, o veículo demora mais para ter sua autonomia completa novamente. Ainda temos que apesar do alto investimento inicial do eletroposto, o custo da energia por meio desse sistema de recarga pode ser atrativo em relação ao combustível fóssil e também a energia residencial. Todavia, para isso é necessário que haja subsídios diretos, isenções e deduções fiscais que já vêm sendo adotados em níveis diversos de governo por todo o mundo (Vaz, 2015). Se tais incentivos viessem a ser considerados no Brasil, além de aumentar a atratividade dos veículos elétricos, o mercado consumidor pressionaria o governo e empresários a investir em logística de carregamento, como no caso do eletroposto solar fotovoltaico.

Há possibilidades de ampliar esse estudo considerando outros tipos de comportamentos de usuários e maior quantidade de veículos elétricos para analisar os impactos na rede elétrica quanto ao consumo e ao despacho de energia por meio do G2V e do V2G.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANFAVEA – Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores. Disponível em: <www.anfavea.com.br/>. Acesso em 10 de Outubro de 2013.
- EHSANI, M., Gao, Y., Miller, J.M. “Hybrid Electric Vehicles: Architecture and Motor Drives”. IEEE. (2007).
- EHSANI, M., Gao, Y., Gay, S. E., Emadi, A. “Modern Electric, Hybrid Electric and Fuel Cells Vehicles: Fundamentals, theory and design”. CRC PRESS, 2004.
- KAGAN, N., M. Gouvea, F. Maia, Daniel. Duarte, J. Labronici, D.S. Guimarães, A. Barreto Neto, J. F. R. da Silva, F. Particelli. “Redes elétricas inteligentes no Brasil: análise de custos e benefícios de um plano nacional de implantação”. 1º ed. - Rio de Janeiro: Synergia: iABRADEE; Brasília: ANEEL, 2013.
- KAR, N.C., Iyer, K.L.V, Labak, A., Xiaomin Lu, Chunyan Lai, Balamurali, A., Esteban, B., Sid-Ahmed, M. “*Courting and Sparking*”. Hybrid Automotive Research and Green Energy (CHARGE), University of Windsor, Canada. Revista: IEEE Electrification. Setembro de 2013.
- KEMPTON, W., Tomic, J. “Vehicle-to-grid power fundamentals: Calculating capacity and net revenue”. Journal of Power Sources (2004).
- LI, X., A. C. Lopes, S. S. Williamson. “On the Suitability of Plug-In Hybrid Electric Vehicle (PHEV) Charging Infrastructures Based on Wind and Solar Energy”, Power Electronics and Energy Research (PEER) Group, Department of Electrical and Computer Engineering – Concordia University. Montreal – Canada, 2009.
- PERES, L. A. P., Pessanha J. F. M., J.V. Serra, F. M. F. Particelli, A. C. I Caldas. “Analysis of the Use of Electric Vehicles by Electric Utility Companies Fleet in Brazil”. IEEE Latin America Transactions, vol 9, nº 7. Dezembro de 2011.
- Revista WebMotors. Disponível em: <<http://revista.webmotors.com.br/opiniao/eletrico-da-renault/1333466081758>>. Acesso em 15 de Outubro de 2013.
- Revista WebMotors. Disponível em: <<http://revista.webmotors.com.br/lancamentos/nissan-anuncia-producao-de-carro-eletrico/1334081106596>>. Acesso em 15 de Outubro de 2013.
- YOSHIMI, K., M. Osawa, D. Yamashita, T. Niimura, R. Yokoyama, T. Masuda, H. Kondou, T. Hirota. “Practical Storage and Utilization of Household Photovoltaic Energy by Electric Vehicle Battery”, IEEE Power Engineering Society, 2012 Innovative Smart Grid Technologies (ISGT). Washington, DC.

- VALLE, H. B. M. (2015) “Aplicação do conceito vehicle-to-grid para nivelamento de carga e suprimimento de pico de demanda”. Escola Politécnica: Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- VAZ, L. F. H., Barros, D. C., Castro, B. H. R. “Veículos híbridos e elétricos: sugestões de políticas públicas para o segmento”. BNDES, 2015.
- VILLALVA, M. G., J. R. Gazoli. “Energia Solar Fotovoltaica”. Editora Érica. São Paulo, 2012.
- ZAMORA, F. H. Pereyra, H. Kagan, M. A. Pelegrini, L. Zamboni, V. L. G. Gardiman, M. Gavazzi, J. P. Niggli Silva, M. A. P. Fredes, J. A. B. Grimori, C. A. M. Gonçalves, A. A. Amedomar, D. E. Carvalho, L. E. Sampaio e P. R. Feldmann. “Evaluation of Electric Vehicles Impacts on Distribution Networks under Different Penetration Scenarios”. Innovative Smart Grid Technologies Latin America (ISGT LA), 2013 IEEE PES Conference On. Sinapsis Inovação em Energia, São Paulo, Brasil.