

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
CÂMPUS CURITIBA
ENGENHARIA ELÉTRICA

CAIO JORGE MARTINS SODRÉ

**ENSAIOS EM UM VEÍCULO ELÉTRICO E SUA INTERAÇÃO COM
SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À REDE**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA

2019

CAIO JORGE MARTINS SODRÉ

**ENSAIOS EM UM VEÍCULO ELÉTRICO E SUA INTERAÇÃO COM
SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À REDE**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação do curso de Engenharia Elétrica do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica (DAELT) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) como requisito para obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Dr. Jair Urbanetz Júnior

CURITIBA
2019

Caio Jorge Martins Sodré

Ensaio em um veículo elétrico e sua interação com sistemas fotovoltaicos conectados à rede

Este Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação foi julgado e aprovado como requisito parcial para a obtenção do Título de Engenheiro Eletricista, do curso de Engenharia Elétrica do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica (DAELT) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Curitiba, 25 de novembro de 2019.

Antonio Carlos Pinho, Dr..
Coordenador de Curso
Engenharia Elétrica

Profa. Annemarien Gehrke Castagna, Mestre
Responsável pelos Trabalhos de Conclusão de Curso
de Engenharia Elétrica do DAELT

ORIENTAÇÃO

Prof. Dr. Jair Urbanetz Júnior
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Orientador

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Jair Urbanetz Júnior
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Profa. Ma. Annemarien Gehrke Castagna.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof; Eng. Carlos Henrique Karam Salata
Universidade Livre do Conhecimento

A folha de aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso de Engenharia Elétrica

RESUMO

SODRÉ, Caio Jorge Martins. **Ensaio Em Um Veículo Elétrico e Sua Interação Com Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede.** 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação - Curso de Engenharia Elétrica). Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2019.

Veículos Elétricos têm se transformado rapidamente de uma tendência em uma realidade, substituindo os combustíveis fósseis como fonte de energia de veículos de locomoção leves e pesados. Uma consequência dessa mudança é o deslocamento do ponto de emissão de gases estufa dos escapamentos de carros nos grandes centros urbanos para as chaminés das usinas geradoras de energia, pois com a necessidade de carregamento dos veículos elétricos, estas virão a usar esses mesmos combustíveis fósseis para geração de energia elétrica nas usinas termoelétricas. Uma saída é a associação desse uso com a geração de energia fotovoltaica distribuída que evita o uso de fontes térmicas para geração de energia, e altos investimentos na ampliação da rede elétrica. Para determinar se essa associação é viável, foram feitos testes para determinar o consumo do protótipo Pompéo e dimensionado um sistema fotovoltaico que atendesse as demandas energéticas desse veículo. Por fim, foi analisado se esse sistema é viável técnica e financeiramente.

Palavras-Chave: Veículos Elétricos. Carros Elétricos. SFCR. Baterias. Sistemas Solares. Pompéo. Viabilidade Solar.

ABSTRACT

SODRÉ, Caio Jorge Martins. **TESTS ON AN ELECTRIC VEHICLE AND ITS INTERACTION WITH PHOTOVOLTAIC SYSTEMS CONNECTED TO THE GRID.**

2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação - Curso de Engenharia Elétrica). Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2019.

Electric vehicles have quickly turned from trend to reality, replacing fossil fuels as a source of energy for light and heavy mobility vehicles. A consequence of this change is the displacement of the greenhouse gas emission point from car exhausts in large urban centers to the chimneys of power plants, because with the need to charge electric vehicles, they will use these same fossil fuels to generation of electricity in thermoelectric plants. A possible solution is the association of this use with distributed photovoltaic power generation that avoids the use of thermal sources for power generation, and high investments in the extension of the electric grid. To determine if this association is feasible, tests were made to determine the consumption of the Pompéo prototype and dimensioned a photovoltaic system that would meet the energy demands of this vehicle. Finally, it was analyzed if this system is technically and financially viable.

Keywords: Electric Vehicles. Electric Cars. Grid Tie. Batteries. Solar Systems. Pompéo. Solar Feasibility.

LISTA DE FIGURAS

| | | |
|-----------|--|----|
| FIGURA 1 | – Primeiro carro elétrico | 10 |
| FIGURA 2 | – Veículo elétrico Pompéo | 12 |
| FIGURA 3 | – Custo de produção de células fotovoltaicas de silício em 4 décadas U\$/Wp | 13 |
| FIGURA 4 | – Primeiro Protótipo. | 20 |
| FIGURA 5 | – VE de Thomas Parker carregando uma família. | 20 |
| FIGURA 6 | – VE de William Morrison. | 21 |
| FIGURA 7 | – <i>Citi-car</i> em museu | 24 |
| FIGURA 8 | – EV1 da General Motor | 25 |
| FIGURA 9 | – Nissan Leaf 2010 | 27 |
| FIGURA 10 | – Tesla Model 3 | 27 |
| FIGURA 11 | – Veículo híbrido série | 29 |
| FIGURA 12 | – Veículo Híbrido Paralelo | 29 |
| FIGURA 13 | – Veículo híbrido série plug-in | 31 |
| FIGURA 14 | – Veículo híbrido paralelo plug-in | 31 |
| FIGURA 15 | – Veículo elétrico a bateria | 32 |
| FIGURA 16 | – processo de carga e descarga de uma bateria secundária | 34 |
| FIGURA 17 | – Bateria de Gaston Planté | 35 |
| FIGURA 18 | – Esquema de baterias chumbo-ácido. a) tradicional; b) <i>deep-cycle</i> | 37 |
| FIGURA 19 | – Ciclo de vida de uma bateria chumbo-ácido por profundidade de descarga | 38 |
| FIGURA 20 | – Ciclo de carregamento de uma bateria chumbo-ácido | 39 |
| FIGURA 21 | – Ciclo de carregamento de uma bateria Li-íon. | 41 |
| FIGURA 22 | – SAE J1772 Combinado | 49 |
| FIGURA 23 | – Componentes da radiação solar | 52 |
| FIGURA 24 | – Célula fotovoltaica | 55 |
| FIGURA 25 | – Processo de Czochralski | 56 |
| FIGURA 26 | – Célula de p-Si | 58 |
| FIGURA 27 | – Sistema fotovoltaico isolado. | 61 |
| FIGURA 28 | – Sistema solar fotovoltaico conectado à rede. | 62 |
| FIGURA 29 | – Potencial de geração solar fotovoltaica. | 64 |
| FIGURA 30 | – Irradiação e produtividade no plano inclinado na latitude | 65 |
| FIGURA 31 | – Local de Teste do Pompéo. | 67 |
| FIGURA 32 | – Percurso de teste | 68 |
| FIGURA 33 | – Simulação de sistema no PV*Sol | 69 |
| FIGURA 34 | – Irradiação total na Sede Neoville | 70 |
| FIGURA 35 | – Balanço financeiro | 75 |
| FIGURA 36 | – H_{tot} no ponto de instalação | 77 |
| FIGURA 37 | – Sombreamento no SFCV | 77 |
| FIGURA 38 | – Tela Inicial PV*Sol | 85 |
| FIGURA 39 | – Parâmetros de entrada PV*Sol | 86 |

LISTA DE TABELAS

| | | |
|----------|--|----|
| TABELA 1 | – Comparativo entre tecnologias de baterias. | 43 |
| TABELA 2 | – Níveis de potencia de carga | 47 |
| TABELA 3 | – Características de Carga e Infraestrutura de Alguns Veículos Elétricos ... | 48 |
| TABELA 4 | – Comparativo entre tecnologias de módulos | 59 |
| TABELA 5 | – Comparativo entre tecnologias de baterias. | 73 |
| TABELA 6 | – Compatibilidade entre inversor e Sistema FV | 75 |
| TABELA 7 | – Métricas associadas ao Sistema Fotovoltaico | 76 |
| TABELA 8 | – Comparativo entre modelos de VE's | 76 |
| TABELA 9 | – Fluxo de Caixa. | 87 |

LISTA DE SIGLAS

| | |
|-----------|---|
| MCI | Motores à Combustão Interna |
| EUA | Estados Unidos da América |
| VEH | Veículo Elétrico Híbrido |
| VMCI | Veículo com Motor a Combustão Interna |
| EUA | Estados Unidos da América |
| Proálcool | Programa Nacional do Álcool |
| GM | General Motors |
| COP | <i>Conference of the Parties</i> |
| CARB | <i>California Air Resources Board</i> |
| ME | Motor Elétrico |
| VEH | Veículo Elétrico Híbrido |
| VHS | Veículo Híbrido Série |
| VHP | Veículo Híbrido Paralelo |
| VHM | Veículo Híbrido Misto |
| VEHP | Veículo Elétrico Híbrido <i>plug-in</i> |
| VEB | Veículo Elétrico a Bateria |
| CV | Cavalo-Vapor |
| kW | Quilowatt |
| Pb-A | Chumbo-Ácido |
| Li-ion | Íons de Lítio |
| Ni-MH | Hidreto Metálico de Níquel |
| V2G | vehicle to grid |
| G | Irradiância solar |
| GDIR | Irradiância direta |
| GDIF | Irradiância difusa |
| GHOR | Irradiância global |
| GALB | Albedo |
| GTOT | Irradiância total |
| I | Irradiação solar |
| H | Irradiação solar |
| IDIR | Irradiação direta |
| HDIR | Irradiação direta |
| IDIF | Irradiação difusa |
| HDIF | Irradiação difusa |
| IHOR | Irradiação global |
| HHOR | Irradiação global |
| ITOT | Irradiação direta |
| HTOT | Irradiação direta |
| m-Si | silício monocristalino |
| PVF | fluoreto de polivinila |
| p-Si | silício policristalino |

| | |
|-------|---|
| CdTe | Telureto de Cádmio |
| CGIS | Disseleneto de Cobre Índio e Gálio |
| Isc | Corrente de curto – circuito |
| Voc | Tensão de circuito aberto |
| STC | Condições – padrão de referência para ensaio |
| Wp | Potência de pico |
| SFI | sistemas fotovoltaicos isolados |
| SFCR | sistemas fotovoltaicos conectados à rede |
| CC | corrente contínua |
| CA | corrente alternada |
| MPPT | buscador do ponto de máxima potência |
| ICMS | Imposto de Circulação de Mercadorias e Serviços |
| UF | unidade da federação |
| INMET | Instituto Nacional de Meteorologia |
| GPS | <i>global positioning system</i> |
| UTFPR | Universidade Tecnológica Federal do Paraná |

SUMÁRIO

| | |
|--|-----------|
| 1 INTRODUÇÃO | 10 |
| 1.1 TEMA | 13 |
| 1.2 DELIMITAÇÃO DO TEMA | 14 |
| 1.3 PROBLEMAS E PREMISSAS | 14 |
| 1.4 OBJETIVOS | 15 |
| 1.4.1 Objetivo Geral | 15 |
| 1.4.2 Objetivos Específicos | 15 |
| 1.5 JUSTIFICATIVA | 16 |
| 1.6 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS | 17 |
| 1.7 ESTRUTURA DO TRABALHO | 17 |
| 2 VEÍCULOS ELÉTRICOS | 19 |
| 2.1 HISTÓRICO | 19 |
| 2.1.1 O início | 19 |
| 2.1.2 O Declínio dos Veículos Elétricos | 22 |
| 2.1.3 A Reabilitação | 23 |
| 2.1.4 Atualidade | 24 |
| 2.2 CLASSIFICAÇÃO | 27 |
| 2.2.1 Veículo Elétrico Híbrido (VEH) | 28 |
| 2.2.2 Veículo Híbrido Série (VHS) | 28 |
| 2.2.3 Veículo Híbrido Paralelo (VHP) | 29 |
| 2.2.4 Veículo Híbrido Misto (VHM) | 30 |
| 2.2.5 Veículo Elétrico Híbrido <i>Plug-in</i> (VEHP) | 30 |
| 2.2.6 Veículo Elétrico a Bateria (VEB) | 31 |
| 3 BATERIAS E ACUMULADORES | 33 |
| 3.1 DEFINIÇÃO DE BATERIAS | 33 |
| 3.1.1 Princípio Básico de Funcionamento | 34 |
| 3.2 BATERIA CHUMBO-ÁCIDO | 35 |
| 3.2.1 Princípio de Funcionamento | 36 |
| 3.2.2 Características | 37 |
| 3.3 ÍONS DE LÍTIO | 39 |
| 3.3.1 Princípio de Funcionamento | 40 |
| 3.3.2 Características | 40 |
| 3.4 COMPARATIVO ENTRE TECNOLOGIAS DE BATERIAS | 42 |
| 3.5 CARREGADORES VEICULARES | 44 |
| 3.5.1 Nível 1 | 45 |
| 3.5.2 Nível 2 | 45 |
| 3.5.3 Nível 3 | 46 |
| 3.5.4 Comparativo Carregadores | 47 |
| 3.5.5 Norma SAE J1772 | 48 |
| 3.5.6 Direcionalidade do carregador | 49 |
| 4 SISTEMAS FOTOVOLTAICOS | 51 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 4.1 | ENERGIA SOLAR | 51 |
| 4.1.1 | Radiação | 52 |
| 4.1.2 | Irradiância | 52 |
| 4.1.3 | Irradiação | 53 |
| 4.1.4 | Efeito Fotovoltaico | 54 |
| 4.2 | TECNOLOGIA DE MÓDULOS | 55 |
| 4.2.1 | Histórico | 55 |
| 4.2.2 | Silício monocristalino | 56 |
| 4.2.3 | Silício policristalino | 57 |
| 4.2.4 | Filmes finos | 58 |
| 4.2.5 | Comparativo entre tecnologias de módulos | 58 |
| 4.3 | SISTEMAS FOTOVOLTAICOS | 60 |
| 4.3.1 | Sistemas Fotovoltaicos Isolados | 60 |
| 4.3.2 | Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede | 62 |
| 4.3.3 | Potencial de geração no Brasil e no estado do Paraná | 63 |
| 5 | MÉTODOS DE ENSAIO E PROJETO | 67 |
| 5.1 | ENSAIOS NO VEÍCULO ELÉTRICO POMPÉO | 67 |
| 5.1.1 | Ensaio de consumo | 68 |
| 5.2 | PROJETO DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO PARA ATENDER O POMPÉO .. | 68 |
| 5.2.1 | Dimensionamento | 69 |
| 5.2.2 | Estudo de Caso: Estacionamento Sede Neoville | 70 |
| 5.3 | VIABILIDADE | 71 |
| 5.4 | CONSIDERAÇÕES | 72 |
| 6 | RESULTADOS E DISCUSSÃO | 73 |
| 6.1 | TESTES NO POMPÉO | 73 |
| 6.2 | DEMANDA E CONSUMO | 74 |
| 6.2.1 | Estudo de Caso: Estacionamento Sede Neoville | 74 |
| 6.3 | VIABILIDADE NO CASO DE ESTUDO | 75 |
| 6.4 | DISCUSSÃO | 76 |
| 7 | CONCLUSÃO | 79 |
| 7.1 | PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS | 80 |
| | REFERÊNCIAS | 81 |
| | Apêndice A – TELA INICIAL PV*SOL | 85 |
| | Apêndice B – PARÂMETROS DE ENTRADA PV*SOL | 86 |
| | Apêndice C – FLUXO DE CAIXA NO ESTUDO DE CASO | 87 |

1 INTRODUÇÃO

O uso de veículos elétricos (VEs) tem crescido no mundo todo, inclusive no Brasil, apesar de ainda estar em seu momento inicial e acontecendo de forma pouco perceptiva. Isso faz com que haja um maior consumo de energia elétrica, o que em retorno nos remete a crescente participação da geração fotovoltaica na matriz elétrica mundial. A relação entre os VEs e a geração fotovoltaica torna-se então um objeto de estudo muito importante para o cenário atual. Ainda que exista uma recente ascensão dos veículos elétricos, isso se dá de forma lenta, em especial no mercado brasileiro.

A eletricidade foi uma das primeiras forças de tração implementadas para veículos automotivos, tendo como seu primeiro modelo comercial aquele inventado por Thomas Parker em 1884, como mostrado na Figura 1, e os primeiros testes de veículos com motores elétricos datam da década de 1860, impulsionados pela invenção da bateria de chumbo-ácido por Gaston Planté (CHAN et al., 2002).

Figura 1: Primeiro carro elétrico



Fonte: (KURIOSITAS, 2010)

Segundo Baran e Legey (2011), nas décadas seguintes ao surgimento dos primeiros carros, pesquisadores importantes da época, como Thomas Edison, desenvolveram tecnologias

para os veículos elétricos, tal como a bateria de chumbo-níquel. Essa tecnologia apresentava um rendimento 40% superior em relação as baterias de chumbo-ácido, porém tinham um custo de produção mais elevado. A tecnologia de frenagem regenerativa também data da virada do século XX, apresentando uma forma de transformar a energia cinética do veículo em energia elétrica, aumentando assim a autonomia do mesmo.

Nos primeiros anos do século XX, houve um crescimento da frota de veículos elétricos, até que, em 1912, atingiu-se o auge. Desta forma, os anos seguintes foram marcados por uma perda de participação deste tipo de veículo no mercado dando lugar para os veículos movidos à combustíveis fósseis. Três grandes fatores são importantes para essa mudança: a diferença de autonomia, a forma de produção e a oferta de combustíveis, que serão comentados no Capítulo 2 (BELLIS, 2017).

Após essa perda de interesse, levou-se mais de cinco décadas para que essa tecnologia recuperasse fôlego, pois com a crise do petróleo da década de 70 o mundo começou a buscar fontes alternativas de energia. Entretanto, não houve sucesso, pois esses apresentavam desempenho muito inferior aos dos carros com Motores à Combustão Interna (MCI's). Novamente, nos anos 90, foi feita uma nova tentativa de introdução dos VEs no mercado, desta vez sendo o *lobby* das montadoras de veículos MCI decisivo para que as medidas governamentais e iniciativas das empresas fossem abandonadas.

O atual interesse nos VEs tem seu início nos anos 2000 com o fomento dessas tecnologias por países como Estados Unidos da América (EUA). Nos últimos anos a China tem se tornado o maior mercado para VEs e Veículos Elétricos Híbridos (VEH's). No Brasil a disponibilidade de modelos ainda é limitada, como o Nissan *Leaf* (VE), o BMW i3(VEH), o Volvo XC60 T8 R-*Design* (VEH). Ainda assim, esses modelos ainda apresentam altos preços para o consumidor final, em preços de 2019 todos os modelos supracitados tem valores acima de R\$ 195.000,00 em suas versões mais básicas.

Nesse campo de estudos a UTFPR está engajada nos testes em alguns veículos elétricos, por exemplo o Pompéo, mostrado na figura 2, um veículo elétrico com 3 rodas, idealizado pelos engenheiros Renato Cesar Pompéo e Carlos Eduardo Momblanch da Motta, pensado para que fosse um veículo leve e para o ambiente urbano. O motor elétrico de 8 kW CC e o conjunto de baterias de íons de lítio deveriam proporcionar autonomia entre 200 e 250 km, porém hoje o carro conta com um banco de baterias chumbo ácido. O Pompéo seria uma opção nacional mais barata e ecologicamente mais interessante para os veículos compactos tendo em vista o custo bem elevado desses.

Figura 2: Veículo elétrico Pompéo



Fonte: A autoria própria (2019).

Uma tecnologia intimamente ligada ao crescimento e avanço dos carro elétricos é a de acumuladores de energia e baterias, bem como seus métodos de carregamento. Segundo Baran e Legey (2011), em relação às baterias de veículos elétricos, há três formas de carga de bateria. A primeira é o método dos veículos híbridos, em que um motor a combustão interna alimenta o sistema de baterias que posteriormente fornece energia ao motor do veículo, sempre mantendo o MCI a altas rotações onde esse apresenta melhor rendimento. Para os veículos *plug-in*, existem pelo menos dois tipos de recarga de baterias. A recarga lenta, que demora aproximadamente oito horas, podendo sofrer variações, muito semelhante à carga de um *notebook*, guardadas as devidas proporções.

O segundo tipo é a recarga rápida sendo uma recarga mais direta, aplicando uma tensão contínua na bateria a partir de um sistema auxiliar, ou seja, de postos de recarga, que podem estar conectados à rede elétrica. Em teoria, seria cobrado o valor da energia gasta das concessionárias e diminuindo assim o tempo de recarga para apenas meia hora.

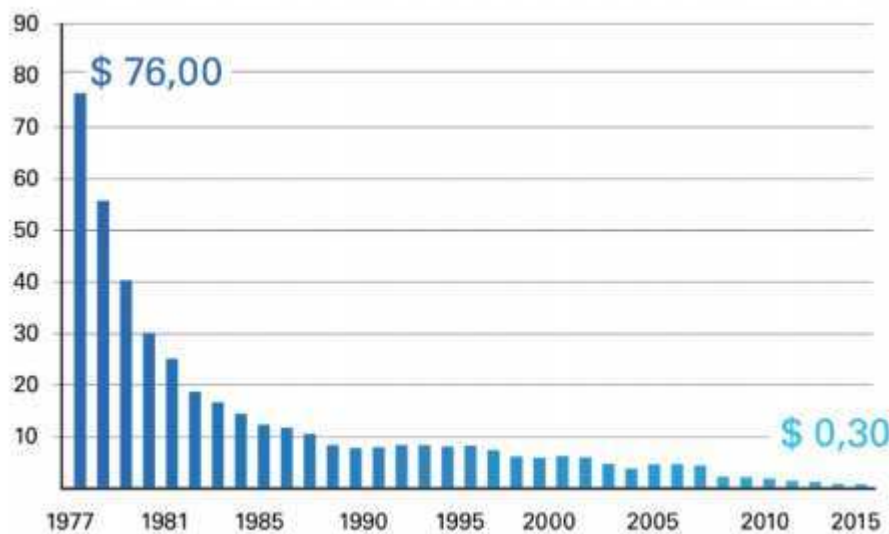
Um problema que surge com essa situação é o impacto do carregamento desses veículos na rede de distribuição (ARAUJO; EICHENBERGER, 2015). Nesse panorama surge a energia solar fotovoltaica descentralizada, que pode aliviar a carga necessária sem que esse pico de demanda se propague pela rede ou que essa energia possa ser gerada sem que isso aumente a demanda de energia gerada por fontes fósseis.

Assim como aconteceu com os veículos elétricos, a tecnologia de geração fotovoltaica teve muitos altos e baixos por motivo semelhante: seus custos em relação às formas tradicionais

de produção. Na década de 1970, com a crise mundial do petróleo, os países do então chamado primeiro mundo deram foco à tecnologia fotovoltaica, porém, assim que a crise terminou e os custos dos combustíveis a base de petróleo caíram, a geração fotovoltaica perdeu competitividade. Somente durante a década de 90 a energia fotovoltaica começou a se firmar no mercado civil, dentre outros motivos pela sua versatilidade e com empresas investindo em tecnologias novas para barateamento dos módulos. Nos últimos anos, percebe-se uma crescente demanda por esse tipo de energia, sendo esse um grande incentivo para a produção e consequente diminuição de preços.

Levando em conta a queda do preço de produção, mostrada na Figura 3, e a inerente demanda extra por energia, serão estudadas formas mais eficientes de carregamento para o veículo elétrico Pompéo. Visando diminuir o seu impacto na demanda de energia, foi estudada a possibilidade de uso de uma garagem coberta com módulos fotovoltaicos para suprir a energia demandada para esse carregamento.

Figura 3: Custo de produção de células fotovoltaicas de silício em 4 décadas U\$ /Wp



Fonte: (PEREIRA, 2019)

1.1 TEMA

Os veículos elétricos conquistam cada vez mais espaço no mercado mundial como uma opção viável e mais atrativa de mobilidade urbana em detrimento do carro com motor a combustão interna. Por outro lado, a adoção dessa forma de propulsão pode acarretar apenas um deslocamento do problema, evitando as emissões de gases estufa pelos escapamentos porém aumentando a necessidade de usinas termoeletricas movidas a carvão e diesel. Em paralelo,

outra tecnologia que tem se destacado no ambiente urbano é a produção de energia fotovoltaica distribuída, sendo uma boa opção para o carregamento de veículos elétricos.

Como será apresentado no Capítulo 2 as tecnologias do veículo elétrico e das baterias estão intimamente ligadas e tem se influenciado mutuamente, sendo um dos principais fatores limitantes para os veículos elétricos, tanto no tocante à autonomia, quanto em relação ao peso agregado ao veículo e no tempo de recarga das mesmas. Os sistemas fotovoltaicos constituem uma forma rápida e barata de contrapor os efeitos dessas novas cargas uma vez que não precisam de áreas para instalação por se integrarem facilmente à arquitetura da construção. Outro ponto de destaque é o comportamento de veículos no ambiente de rodagem local, uma vez que muitos dos testes de análises nesse sentido são feitos em outros países com outros climas e condições de rodagem.

1.2 DELIMITAÇÃO DO TEMA

Nesse contexto de aumento de vendas e popularização desse tipo de produto, o impacto do consumo dos veículos elétricos na rede elétrica começa a ser considerado e discutido. Bem como seu impacto nos picos de consumo, deslocamento e intensidade, formas alternativas de suprir a energia demandada pelas baterias.

Ensaçar e discutir os parâmetros de consumo são formas de aproximar os modelos existentes da utilização real e ajudará a pensar em como esse tipo de veículo afetará o consumo de energia elétrica.

A energia fotovoltaica tem se demonstrado muito versátil e cada vez mais competitiva, então parece natural fazer uma integração entre essas duas tecnologias. Carregar as baterias do veículo elétrico Pompéo usando a energia proveniente de um sistema fotovoltaico interligado à rede.

Dessa forma ao agregar essas duas tecnologias surge uma possibilidade de solução rápida de grande durabilidade e barata para o problema de geração de energia para esses casos.

1.3 PROBLEMAS E PREMISSAS

Os veículos elétricos não são mais algo abstrato e futurista. Eles já são realidade em muitos países, inclusive o Brasil, mesmo que de forma inicial ainda. Porém, grande parte dos dados coletados são estimativas feitas em países estrangeiros e pouco se sabe sobre o desempenho desses veículos em condições reais no Brasil.

No Brasil o crescimento dos veículos elétricos acontece de forma lenta e sem muitos incentivos. Apenas alguns estados dão o incentivo relativo ao IPVA (ABVE, 2017). Este poderia ser um grande auxílio na popularização dos veículos elétricos, uma vez que esse imposto é cobrado sobre o valor do veículo e os automóveis elétricos tem, em vias de regras, custos bem elevados em comparação aos seus concorrentes com motores a combustão interna.

Mesmo tendo o fator econômico em vista, o grande problema associado aos VE's é relacionado à alimentação energética dessas tomadas e postos de energia. Considerar a expansão desse modal sem considerar a fonte de alimentação necessária para tal poderia apenas estar deslocando o problema, deixando de queimar gasolina nos motores para queimar carvão ou gerar mais lixo radioativo nas usinas térmicas ou nucleares.

Nesse contexto há outra tecnologia que tem se destacado nos últimos anos e pode representar uma solução viável, limpa e com o valor econômico cada vez mais competitivo: a energia fotovoltaica.

De que maneira essas duas tecnologias se alinhariam? Como o ambiente urbano e o clima interfeririam no comportamento dos módulos fotovoltaicos? Será que a redução de impostos teria por si só um fator decisivo para a popularização do veículo elétrico? Como um veículo elétrico, a princípio o Pompéu, se comportaria em testes de rodagem e como isso afetaria seu consumo? Será que a energia fotovoltaica seria o suficiente para manter um veículo?

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo Geral

Realizar ensaios com o veículo elétrico Pompéu, comparar com outros dados já conhecidos de veículos, e então dimensionar uma vaga com cobertura solar fotovoltaica conectada à rede para atender a demanda exigida pelo mesmo.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Estudar funcionamento dos veículos elétricos, detalhando os modelos e tipos existentes na atualidade;
- Estudar os tipos e utilizações das baterias empregadas nos veículos elétricos e comparar seus dados de consumo;
- Estudar os sistemas fotovoltaicos e suas topologias;

- Obter dados de geração fotovoltaica com base nos sistemas existentes na UTFPR;
- Realizar testes no veículo elétrico Pompéo, levantando dados de consumo de energia elétrica:
 - Teste de consumo;
 - Teste de autonomia;
 - Teste de *stand-by*;
- Comparar os resultados obtidos com os dados de outros veículos elétricos;
- Projetar um sistema fotovoltaico conectado à rede capaz de atender à demanda do Pompéo, sob determinado panorama.

1.5 JUSTIFICATIVA

A importância dos carros no cotidiano da sociedade é inegável, principalmente com o crescimento de grandes centros urbanos. Tendo isso em vista, deve-se entender que garantir que fontes de energia para esses veículos é algo crucial para o desenvolvimento de uma sociedade.

Hoje sabe-se também que os combustíveis fósseis além de ter um grande impacto ambiental, tem uma quantidade finita e cada vez menor disponível para a utilização. Em contrapartida a energia elétrica, como fonte de energia para automóveis mostra uma alternativa eficiente e sem um grande impacto ambiental no seu local de uso. Porém, viabilizar os veículos elétricos somente financeiramente não resolve o problema se o carvão ainda for a fonte primária dessa energia.

Nesse contexto a energia fotovoltaica, em especial os sistemas conectados à rede elétrica, se destacam por suas características adaptáveis e de fácil implementação e de geração descentralizada.

Ao utilizar um veículo real para que sejam feitos ensaios e feito o levantamento de suas características. Pois muitas vezes os perfis de consumo não correspondem às condições reais de uso. Com esses dados pode-se traçar de forma mais fidedigna um perfil de consumo alinhado com as condições do ambiente local.

1.6 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Foi feita uma revisão bibliográfica, tendo como foco veículos elétricos, tecnologias de baterias e geração solar por módulos fotovoltaicos.

Partindo destas informações serão feitos ensaios com um veículo elétrico Pompéu. Com auxílio de GPS e medidores de energia serão levantados o consumo em um trecho fixo, em *stand-by* e a autonomia em um ciclo de baterias. Tendo os dados analisados, poderá então se ver a aplicabilidade de módulos fotovoltaicos e quais os seus requisitos de aplicação.

Para a integração dos conteúdos serão então apresentados os resultados dos ensaios, bem como proposta uma solução que comporte a interligação dos veículos elétricos, rede existente e a geração distribuída.

1.7 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está estruturado da seguinte maneira:

Capítulo 1: **Introdução**. Composto pelo tema, problemas e premissas, objetivos gerais e específicos e justificativa. Este capítulo é destinado à delimitação do tema, definição dos objetivos, estruturação do trabalho e escolha dos métodos a serem utilizados;

Capítulo 2: **Veículos Elétricos**. Este capítulo contém a fundamentação teórica sobre veículos elétricos, apresentando histórico, definições e propriedades desses veículos, dando suporte para a compreensão das topologias e metodologias posteriormente aplicadas;

Capítulo 3: **Baterias**. Será responsável por apresentar os diferentes tipos tecnologia aplicadas em baterias, seus principais componentes, ciclos de carga, limitações e falar sobre os diferentes tipos de carregadores veiculares;

Capítulo 4: **Sistemas Fotovoltaicos**. Neste capítulo são apresentados os conceitos teóricos sobre sistemas fotovoltaicos, tecnologias de módulos, sua dinâmica com a rede elétrica e potencial de produção do Paraná;

Capítulo 5: **Ensaio com o Veículo Elétrico Pompéu**. Este capítulo aborda a metodologia experimental utilizada no trabalho, os resultados dos testes feitos no veículo elétrico Pompéu e uma comparação com outros modelos.

Capítulo 6: **Projeto de um Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede para atender o Pompéu**. Esse capítulo aborda a metodologia para o projeto de implantação de uma vaga

solar para atender o Pompéo, definindo uma dinâmica de carregamento e uma abrangência de cobertura.

Capítulo 7: **Conclusões de Discussões**. Esse capítulo os resultados são discutidos e é avaliada a viabilidade do desempenho do Pompéo, do sistema de carregamento. Os resultados são comparados com modelos já à venda no mercado brasileiro. Serão propostos novos temas para trabalhos subsequentes.

2 VEÍCULOS ELÉTRICOS

Segundo Chan et al. (2002), um VE (Veículo Elétrico) é um veículo rodoviário baseado em uma propulsão elétrica o qual consiste em um motor elétrico, um conversor de energia, seja ela uma conversão direta de energia, ou indireta, e uma fonte de energia para alimentar o conversor.

A partir dessa definição pode-se classificar os VE's como sendo de conversão direta, onde um banco de baterias alimenta um alternador, ou de conversão indireta, sendo usada algum outro combustível para alimentar um “grupo motogerador”. Esse combustível pode ser: gasolina, álcool, gás natural entre outros.

Neste capítulo serão apresentados os conceitos referentes a veículos elétricos. Na seção 2.1 serão apresentadas as etapa de desenvolvimentos e de mercado para os Veículos Elétricos. Na seção 2.2 será apresentado a classificação dos veículos elétricos e seus princípios de funcionamento.

2.1 HISTÓRICO

Ao contrário do que é altamente difundido no senso comum, os veículo elétrico não são um conceito novo sendo 50 anos mais antigo que o Veículo com Motor a Combustão Interna (VMCI's) (CHAN, 2013).

2.1.1 O início

No início do século XIX, inovadores na Hungria, Holanda e Estados Unidos começaram a elaborar o conceito de um veículo movido a bateria criando assim os primeiros veículos elétricos, mesmo que em pequena escala. Ficou reconhecido como o primeiro veículo elétrico o protótipo criado pelo Ányos Jedlik em 1829, apresentado na Figura 4 (BELLIS, 2017).

Figura 4: Primeiro Protótipo.



Fonte: ELECTRIC VEHICLES NEWS.

Segundo Chan (2013), nos anos seguintes surgiram várias iniciativas para desenvolver os veículos automotores movidos por eletricidade, primeiramente por pilhas elétricas e posteriormente por baterias. Nesse período as grandes inovações nesse ramo estavam a cargo dos ingleses e franceses como o inventor Thomas Parker que, em 1884, apresentou o primeiro veículo elétrico capaz de mover a si próprio, seu condutor e mais pessoas, como apresentado na Figura 5. Tornando-se, assim, o primeiro veículo elétrico funcional a ser apresentado ao público (BELLIS, 2017).

Figura 5: VE de Thomas Parker carregando uma família.



Fonte: ELECTRIC VEHICLES NEWS.

Nos Estados Unidos da América (EUA), o primeiro veículo elétrico funcional a ser

apresentado ao público foi o modelo de William Morrison lançado em 1891 (CHAN, 2013), com capacidade para seis passageiros e velocidade máxima de 22 Km/h, apresentado na Figura 6. Esse modelo não era muito mais que um vagão elétrico, mas serviu para despertar o interesse de investidores no ramo (MATULKA, 2014).

Figura 6: VE de William Morrison.



Fonte: (CHAN, 2013)

O interesse em veículos elétricos cresceu de tal forma que em 1897 foi às ruas a primeira frota de táxis elétricos em Nova Iorque, EUA, com mais de 60 táxis elétricos, sendo a primeira aplicação comercial usando veículos elétricos (FONTAINHAS, 2013). Segundo Chan (2013), a virada do século foi uma época de crescimento para o mercado de veículos elétricos, sendo esses os mais vendidos mesmo com a introdução de outras fontes de energia. Em 1900, a participação dos veículos elétricos era estimada em 30% de todos os veículos rodoviários e durante a primeira década do século XX eles apresentaram fortes vendas (MATULKA, 2014).

Um exemplo é o Pantheos, lançado em 1902, com autonomia aproximada de 30 km e velocidade máxima de 22 km/h. Este veículo foi vendido na época por dois mil dólares. A *Woods Motor Vehicle Company of Chicago*, montadora do Pantheos, também é responsável pela introdução do primeiro veículo híbrido em 1916, usando um motor de combustão interna e um motor elétrico (CHAN, 2013).

Poderia se pensar que os veículos elétricos eram hegemônicos, mas havia outros modais, como os MCI e vapor. Os primeiros veículos criados, usavam o vapor como fonte de

energia, isso durante o século XVIII. Entretanto caiu rapidamente em desuso pois eles deveriam parar regularmente para repor a água, além de seu tempo de partida ser elevado, chegando em 45 minutos no frio, o que é pouco prático para um veículo pessoal (MATULKA, 2014).

Os veículos a gasolina também fizeram entrarem no mercado nesse período, mesmo sendo cotados como promessas, graças às melhorias realizadas nos motores nos anos de 1800, mesmo assim ainda tinham falhas. Era preciso dar a partida manualmente girando uma manivela, mudar as marchas era um trabalho exaustivo, além dos gases do escapamento serem desagradáveis (MATULKA, 2014). Nesses aspectos, os veículos elétricos tinham vantagem, uma vez que o VE não tinha marchas, a transmissão era direta, não vibravam tanto, não faziam barulho e não emitiam gases. Isso o tornava excelente para pequenas viagens nas vias dentro do perímetro urbano, que eram até então as únicas com condições de tráfego por automóveis independente do seu tipo (MATULKA, 2014).

Com a popularização da energia elétrica, facilitação de carregamento do veículo elétrico e o apelo crescente dentre a população, alguns dos mais notórios donos de montadoras de veículos a gasolina foram forçados a voltar os olhos para os veículos elétricos. Um exemplo é Ferdinand Porsche, fundador da montadora de mesmo nome, que desenvolveram um veículo elétrico chamado P1, em 1888. Outro exemplo de como veículos elétricos eram vistos, pode-se citar o inventor Thomas Alva Edison que chegou a afirmar que os VE seriam a tecnologia superior e trabalhou para construir uma bateria automobilística mais eficiente. Até mesmo Henry Ford chegou a trabalhar em parceria com Edison para explorar opções para um veículo elétrico de baixo custo (MATULKA, 2014). Com seu pico de produção no ano de 1912 os VE's fizeram grande sucesso até a década de 1920 (BELLIS, 2017).

2.1.2 O Declínio dos Veículos Elétricos

Segundo Baran e Legey (2011) e Chan (2013), na década seguinte ocorreu um declínio dos veículos elétricos, quase chegando a extinção em 1935, e ao mesmo tempo uma ascensão dos veículos com motores a combustão interna. Esse fenômeno se deu por uma conjuntura de fatores. Em 1908, foi lançado o modelo T da Ford sendo produzido em massa, o que diminuía os custos de produção, barateando assim os seus custos finais. Em 1912, um modelo T a gasolina custava apenas US\$ 650, enquanto um veículo elétrico era vendido por US\$ 1.750. Essa diferença de preços impulsionava a popularização dos veículos a combustão interna. Esse ano, Charles Kettering introduziu o conceito de partida elétrica onde um pequeno motor elétrico faz as primeiras rotações do motor a combustão eliminando a necessidade da partida manual, diminuindo o esforço necessário e tornando o VCI ainda mais atrativo (CHAN, 2013).

A descoberta de grandes reservas de petróleo no Texas barateou o preço do combustível, tornando assim mais viável a abertura de novos postos que começaram se multiplicar nos anos seguintes (BARAN; LEGEY, 2011). O recarregando das baterias chumbo-ácido custava aproximadamente 20 centavos por quilowatt-hora, em comparação com o preenchimento com cinco centavos um galão de gasolina naquela época (CHAN, 2013).

Com a expansão da malha viária interurbana nos anos 20 demandava veículos com maior autonomia e os postos cada vez mais presentes deram uma dianteira para os veículos a gasolina (MATULKA, 2014).

Todos esses aspectos tornaram a produção de veículos elétricos impraticável, somado a isso a segunda guerra focou quase toda a produção em veículos a gasolina o que levou os veículos elétricos a serem quase extintos.

O crescimento e desenvolvimento tecnológico pelas próximas décadas foram irrisórios, com empresas sendo compradas pelas montadoras maiores apenas para que um ou outro aspecto dos veículos elétricos fossem aproveitados em seus modelos a combustão (BELLIS, 2017).

2.1.3 A Reabilitação

Segundo Baran e Legey (2011) avanços tecnológicos só voltaram a ser significantes nos anos 60 com a pressão para redução dos gases emitidos pelos veículos a combustão interna incentivaram a busca por veículos com sistemas de propulsão alternativos. Nesse período pode-se destacar algumas iniciativas.

A *Batronic Truck* no começo dos anos 60 lançou alguns modelos de veículos elétricos, dentre eles o primeiro modelo de caminhão elétrico tendo velocidade máxima de 40 km/h e autonomia de 105 quilômetros além de capacidade de carga de cerca de 114 kg, sendo seu primeiro exemplar entregue em 1964 (BELLIS, 2017).

Outro fator decisivo para trazer de volta o interesse no desenvolvimento dos veículos elétricos foram as crises globais associadas com o fornecimento de combustível que ocorreram no início da década de 70 com aumento dos valores chegando a ordem de 400% . Essa situação levou diversos países a adotarem medidas de incentivo à pesquisa e desenvolvimento de veículos movidos a fontes alternativas de energia, como em 1975 o Programa Nacional do Álcool (Proálcool) no Brasil e nos Estados Unidos em 1976 onde foi aprovada a Lei de Pesquisa, Desenvolvimento e Demonstração de Veículos Elétricos e Híbridos que autorizada o Departamento de Energia a apoiar pesquisas e o desenvolvimento de veículos elétricos e híbridos (MATULKA, 2014).

Impulsionados por esses incentivos muitas empresas grandes e pequenas desenvolveram modelos visando explorar o nicho de combustíveis alternativos incluindo veículos elétricos. A *General Motors* (GM) expôs em 1973 no Primeiro Simpósio da Agência de Proteção Ambiental sobre o Desenvolvimento de Sistemas de Baixa Poluição um protótipo de veículo elétrico urbano. A *Sebring-Vanguard*, chegou a produzir 2.000 *Citi-cars*, mostrado na Figura 7, esse modelo tinha velocidade máxima de 70 km/h e autônoma de 80 a 110 quilômetros quando a uma velocidade de 60 km/h. O Elcar da empresa *Elcar Corporation* chegava a 65 km/h e tinha autonomia de 96 quilômetros (BELLIS, 2017).

Figura 7: Citi-car em museu



Fonte: *Inside EV's* (2014)

Uma iniciativa que merece destaque é a do Serviço Postal dos Estados Unidos, que em 1975 que adquiriu 350 jipes de entrega elétricos da empresa *American Motor Company* que tinham autonomia de 80 quilômetros quando a uma velocidade de 80 km/h (BELLIS, 2017).

Mesmo com essas experiências os veículos elétricos produzidos na década de 70 tinham desempenhos abaixo dos modelos movidos a combustíveis fósseis, com relação entre tempo de direção por tempo de recarga muito baixa, uma vez que a autonomia do automóvel era suficiente para aproximadamente uma hora de direção enquanto o tempo de recarga era muito elevado. No exemplo do Serviço Postal o tempo de recarga típico era de dez horas.

2.1.4 Atualidade

Segundo Baran e Legey (2011), os veículos elétricos só ganharam a visibilidade do mercado novamente nos anos 90, nesse meio tempo houve desenvolvimento de tecnologias com grandes marcas comprando pequenas empresas com a intenção de apropriar a tecnologia

para seus modelos.

Esse retorno foi impulsionado em grande parte pelos acordos firmados nas primeiras *Conference of the Parties* (COP), que foi uma conferência internacional que resultou em acordos para a limitação dos impactos da humanidade na biodiversidade e no clima do planeta. Um dos pontos tratados eram a emissão dos gases de efeito estufa como o CO_2 expelido, dentre outras formas, pelo escapamentos dos veículos a combustão interna (MATULKA, 2014).

Nesse contexto várias leis foram aprovadas servindo como marco no incentivo para a dispersão dos veículos elétricos, principalmente do congresso americano. Alguns exemplos são a Emenda do Ato do Ar Limpo de 1990, do Ato de Política Energética de 1992. Além de regulamentos emitidos pelo *California Air Resources Board* (CARB) para a emissão de poluentes por veículos. Essas regulamentações incentivaram a pesquisa e desenvolvimento não só dos veículos em si, mas também em pesquisa de tecnologia de armazenamento de energia, nesse caso baterias (MATULKA, 2014).

Um veículo que pode ser usado como símbolo desse momento foi o GM EV1, Figura 8, advindo do veículo-conceito *Impact* e lançado em 1990, tinha como fonte baterias de chumbo-ácido e posteriormente níquel-hidreto com autonomias de 160 quilômetros e 220 quilômetros respectivamente. Vendido pelo método de *leasing* que mantinha a propriedade o automóvel com a empresa e com um contrato a ser sempre renovado. A maioria dos compradores o usou como veículo secundário o usando para tarefas do dia-a-dia, ainda mantendo um veículo a combustão interna para trajetos maiores como viagens por exemplo (WITZENBURG, 2008).

Figura 8: EV1 da General Motor



Fonte: ELECTRIC VEHICLES NEWS (2018)

De fato, o GM EV1 teve relativo sucesso, porém com mudanças nas leis, uma vez que as empresas do ramo automotivo recorreram do CARB e ele foi alterado, além do marketing negativo dessas empresas em detrimento dos veículos elétricos. A General Motors encerrou a produção em 1999 e em 2002 foi anunciado o recolhimento de todos os exemplares do EV1 que foram destruídos para evitar sua volta ao tráfego, uma vez que a montadora era obrigada a manter peças de reposição enquanto ainda tivessem veículos circulando (WITZENBURG, 2008).

Mesmo com os veículos fora dos holofotes, as pesquisas e desenvolvimento desses veículos, incluindo estudos nos armazenadores de energia, nunca pararam. O ponto de virada para os veículos elétricos viria na virada do século XXI (MATULKA, 2014).

O Lançamento do veículo híbrido Toyota Prius no Japão em 1997, é considerado por muitos o começo da atual geração de veículos elétricos, sendo o lançamento mundial no ano 2000 e se tornando um sucesso entre celebridades e na alta classe o que o ajudou a se estabelecer no mercado (MATULKA, 2014).

Nos anos seguintes vários modelos de veículos elétricos e híbridos entraram no mercado, com desempenhos superiores tanto em velocidade quanto em autonomia. Os sistemas de recarga evoluíram permitindo opções de recargas mais rápidas. Como por exemplo o Nissan Leaf, mostrado na Figura 9, lançado em 2010 como o primeiro veículo com emissões nulas, sendo vendido na época ao custo de US\$ 29.650 na versão mais básica, possui uma autonomia de máxima de 160 km usando sistemas de baterias de Íon-Lítio que podem ser recarregadas a 80% em meia hora (BARROS, 2013).

Uma empresa que teve grande impacto no mercado de veículos elétricos foi a *Tesla Motors*. Fundada em 2003 por Martin Eberhard e Marc Tarpenning, a empresa nasceu em 2003 com o objetivo de alinhar alto desempenho e um design atrativo. No ano de 2004, em uma rodada de investimento, Elon Musk entra com um aporte de 7,5 milhões de dólares. Em 2008 foi lançado o Roadster com autonomia de 320 quilômetros, recebendo pacotes de atualização nas suas versões posteriores e podendo chegar a 400 quilômetros de autonomia. Sendo um grande esforço empregado na melhoria de baterias e na gestão delas, criando produtos que diminuíssem o impacto de se obter um veículo elétrico, como por exemplo a *Tesla Powerwall* (KLEINA, 2017).

O último modelo da Tesla a entrar no mercado foi o Model 3, mostrado na Figura 10, com 460 quilômetros de autonomia em sua versão mais básica e sendo vendido a US\$ 35.000,00 (NOYA, 2018).

Figura 9: Nissan Leaf 2010



Fonte: EXTREME TECH (2012)

Figura 10: Tesla Model 3



Fonte: (NOYA, 2018)

2.2 CLASSIFICAÇÃO

Para Barros (2013) e Araujo e Eichenberger (2015), veículo elétrico é todo e qualquer veículo automotor que possua no mínimo uma de suas propulsões realizada por um motor elétrico, No estudo aqui proposto o foco será dado para carros elétricos daqui para frente designados como veículos elétricos que se define como sendo um veículo de rodas para transportar pessoas ou carga, dotado de um propulsor elétrico conectado a pelo menos uma

de suas rodas.

Para Araujo e Eichenberger (2015), todos os veículos elétricos se baseiam na conversão da energia elétrica de suas baterias em movimento. Sendo assim podem ser classificados pela origem da energia que carrega as baterias, podendo ser um VEH, no qual um motor à combustão interna direciona a energia gerada para um conversor que faz as vezes de controlador de carga e a partir dele a energia segue para o Motor Elétrico (ME), nessa modalidade pode-se ter veículos *plug-in* que obtêm parte de sua energia da rede elétrica. Outra fonte seriam os VE's, onde sua fonte de energia primária que já é elétrica carrega as baterias.

2.2.1 Veículo Elétrico Híbrido (VEH)

Os Veículos Elétricos Híbridos (VEH's) possuem sistemas de baterias significativamente menores que os de um VE, podendo chegar a 20% da capacidade, variando de 1 a 2 kWh, sendo projetado para armazenar a energia regenerada do sistema de frenagem ou gerada a partir do MCI (FULTON et al., 2009).

Essa configuração além de representar uma transição suave do ponto de vista do mercado de combustíveis, apresenta maior eficiência que os modelos com MCI, usando o motor elétrico para compensar a baixa eficiência quando o motor opera em baixas rotações (5% a 10%), enquanto em altas rotações chega a 28%. Em contrapartida o motor elétrico apresenta maior torque quando em baixas rotações. Para rotações mais altas o VEH usa o motor a gasolina (BARAN; LEGEY, 2011).

Esse tipo de operação tem impacto principalmente em âmbito urbano, onde os motores trabalham a maior parte do tempo em baixa rotação. A economia de combustível chega a 40% em meio urbano, entre 15% e 20% em estradas, porém em estradas de alta velocidade esse consumo pode não apresentar economia (ARAUJO; EICHENBERGER, 2015).

Segundo Baran e Legey (2011), pode-se dividir os VEH, segundo sua topologia de funcionamento, em 3 grandes categorias.

2.2.2 Veículo Híbrido Série (VHS)

Segundo Baran e Legey (2011), veículos Híbridos Série (VHS's) são veículos onde a tração das rodas é feita exclusivamente pelo motor elétrico, Figura 11. O MCI movimenta o gerador que recarrega as baterias, tipicamente maiores que nas outras configurações. Essa arquitetura de funcionamento lida bem em ambientes urbanos, trabalhando em baixa rotação e

com muitas paradas, uma vez que o MCI não trabalhará a baixa rotação, evitando a zona de baixa eficiência do ciclo Otto (ARAUJO; EICHENBERGER, 2015).

Figura 11: Veículo híbrido série

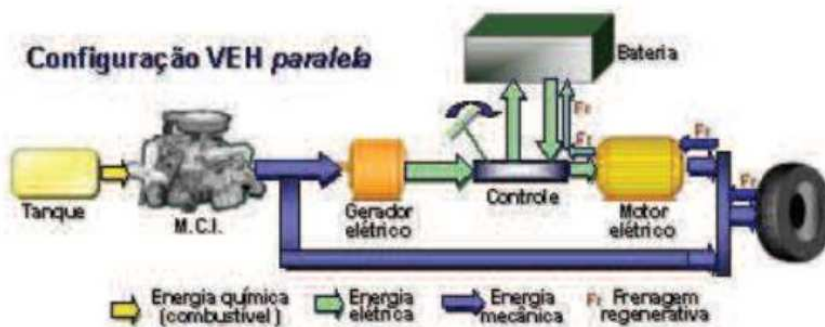


Fonte: (BARROS, 2013)

2.2.3 Veículo Híbrido Paralelo (VHP)

Os Veículos Híbridos Paralelo (VHP's) são veículos onde o MCI participa diretamente da tração das rodas, sendo auxiliado pelo motor elétrico em momentos onde seja necessária mais potência, por exemplo subida de ladeiras e arrancadas. A carga das baterias fica a cargo do motor elétrico que, quando não está sendo solicitado ou quando a potência do MCI usado é maior que a requerida, funciona como gerador para as baterias, mostrado na Figura 12 (CHAU; WONG, 2002). Com o uso desta arquitetura, o VHP provém melhor desempenho em autoestradas que os híbridos tipo série, além de necessitar de um MCI menor em comparação com um veículo convencional equivalente além e um motor elétrico menor que o de um VEH série (ARAUJO; EICHENBERGER, 2015).

Figura 12: Veículo Híbrido Paralelo



Fonte: (BARROS, 2013)

2.2.4 Veículo Híbrido Misto (VHM)

Os Veículo Híbrido Misto (VHM) dois motores elétricos participam, um em série para carregamento das baterias e o outro em paralelo para auxiliar o MCI na tração do veículo. Essa configuração tenta alinhar as vantagens das duas arquiteturas, porém precisa de um sistema de baterias mais robusto – consequentemente mais pesado- além e um sistema de controle mais complexo, uma vez que a gestão dos motores se torna ainda mais complicada (ARAUJO; EICHENBERGER, 2015). Com os avanços em sistemas de controle e tecnologias essa arquitetura tem se tornado a mais aplicada em VEH, como o modelo Prius da Toyota.

Todas as arquiteturas até agora citadas podem ser recarregadas pelo MCI, bem como por um sistema de freios regenerativos, onde a energia cinética da parada do veículo é convertida em energia elétrica para as baterias. Não sendo necessárias fontes elétricas externas (ARAUJO; EICHENBERGER, 2015).

2.2.5 Veículo Elétrico Híbrido *Plug-in*(VEHP)

Os Veículos Elétricos Híbridos *plug-in* (VEHP's) são considerados um avanço para os VEH, no que se trata de eletrificação e autonomia. Esses modelos podem ter configuração série - Figura 13 - ou paralelo -Figura 14. Tanto os veículos VEH quanto os VEHP tem um MCI e um banco de baterias, além de poderem contar com frenagem regenerativa, porém os VEHP podem ser recarregados por uma fonte externa de energia, fazendo com que os primeiros quilômetros rodados sejam exclusivamente movidos pelas baterias e o MCI só entraria em funcionamento quando os acumuladores atingissem um determinado nível de carga (BARAN; LEGEY, 2011). Para tanto seus bancos de bateria tendem a ser maiores que os de VEH off grid - veículos sem participação de fontes externas de energia - chegando a ser cinco vezes maiores (FULTON et al., 2009).

A autonomia de veículos híbridos *plug-in* é indicada por VEHPX com “X” indicando a autonomia do veículo usando somente a energia do seu banco de baterias quando totalmente carregado. Por exemplo, um veículo VEHP20 percorreria 20 quilômetros antes que suas baterias chegassem ao seu nível crítico. Valores típicos ficam entre 20 e 100 quilômetros (FULTON et al., 2009).

Figura 13: Veículo híbrido série plug-in



Fonte: (BARROS, 2013)

Figura 14: Veículo híbrido paralelo plug-in



Fonte: (BARROS, 2013)

2.2.6 Veículo Elétrico a Bateria (VEB)

Os Veículos Elétricos a Bateria (VEB's) serão o foco do presente estudo. São denominados assim veículos cuja força provém de um ou mais motores elétricos alimentados pelo banco de bateria, esses veículos são alimentados quase exclusivamente por fontes de energia externas, com pequenos incrementos de energia sendo dados por sistemas auxiliares como a frenagem regenerativa, como mostra a Figura 15. Esses veículos não necessitam da transmissão sendo a força gerada pelos motores e injetada diretamente na transmissão, sendo assim toda sua potência está disponível no instante de acionamento do VEB (ARAÚJO; EICHENBERGER, 2015).

Figura 15: Veículo elétrico a bateria



Fonte: (BARROS, 2013)

O principal problema desse tipo de veículo advém das baterias: sua autonomia, tempo de duração de recarga e tempo de vida útil graças aos ciclos de carga-descarga. As cidades em sua grande maioria não dispõem de uma infraestrutura que possibilite a recarga desses veículos em tempo hábil para o uso cotidiano. Para compensar a falta de uma energia auxiliar, que nos VEH vem do motor a combustão interna, os VE's têm grandes bancos de baterias, o que acarreta um maior peso, além de aumentar os gastos com manutenção, uma vez que os bancos de baterias precisam ser trocados periodicamente. Em contrapartida, a eficiência desses modelos se mostra bem superior, além de não produzirem gases do efeito estufa em sua operação. Os motores elétricos têm valores de eficiência típicos em torno de 90% contra 15% dos MCI. Estima-se que essa configuração seja 3 vezes mais eficiente que um modelo a combustão interna e 2 vezes mais eficiente que um modelo híbrido (FULTON et al., 2009).

A exemplo dos modelos aqui expostos deve-se classificar o Pompéo como um veículo elétrico à bateria, uma vez que o eixo de tração é alimentado exclusivamente pelo ME de 11 Cavalos-Vapor (CV) - 8 quilowatts (kW)- ligados à bateria por meio de um sistema de controle por inversor de frequência, sendo essa carregada unicamente por energia advinda da rede elétrica.

3 BATERIAS E ACUMULADORES

Como apresentado na seção 2.1, o desenvolvimento de baterias e acumuladores está intimamente ligado ao desenvolvimento dos veículos elétricos. Isso se dá uma vez que o banco de baterias, além de definir a autonomia do veículo, representa uma parcela significativa do peso e espaço ocupado do veículo, por isso o tempo de recarga cresce de acordo com a capacidade de armazenamento do banco de baterias e por fim o número de ciclos de carga-descarga definem a vida útil do banco.

3.1 DEFINIÇÃO DE BATERIAS

Segundo Dunn et al. (2011), células eletroquímicas são dispositivos, compostos de 2 eletrodos e um meio que favorece a troca de elétrons entre eles. De acordo com Cavalcante et al. (2005) esses dispositivos podem ser classificados em baterias primárias e secundárias.

Nesse sentido as baterias primárias são consideradas dispositivos que após serem descarregados uma vez, não permitem recargas, ou quando permitem, apenas uma pequena fração da energia é repostada sendo substituídos por novos dispositivos. Um exemplo comum desse tipo de dispositivo são as pilhas (CAVALCANTE et al., 2005).

Então nesse mesma acepção as baterias secundárias são compostas por elementos que permitem, diante da reversão do sentido da energia, a reposição da energia armazenada chega muito próxima a carga anterior da célula. Esse ciclo de carga-descarga pode se repetir várias vezes dependendo da tecnologia. É esse tipo de bateria que é encontrada nos celulares, VE e sistemas fotovoltaicos com acumuladores (CAVALCANTE et al., 2005).

A tensão gerada pela bateria depende dos materiais envolvidos no processo químico. Principalmente em seus eletrodos, enquanto a energia depende da quantidade e natureza dos elementos envolvidos. Já a capacidade de fornecimento de energia de uma bateria depende de vários fatores como temperatura, constituição das células em seu interior, temperatura de trabalho, além da composição química da bateria (COPETTI; MACAGNAN, 2007).

3.1.1 Princípio Básico de Funcionamento

Segundo Jones et al. (2017) a estrutura da maioria das tecnologias de baterias contém os mesmos elementos básicos. Os eletrodos que são compostos de metais, um receptor de elétrons (catodo) e um que doa os elétrons. Esses elementos são mergulhados ou embebidos em um meio que favoreça a troca de elétrons(eletrólito) fechando assim o circuito por onde fluirão os elétrons.

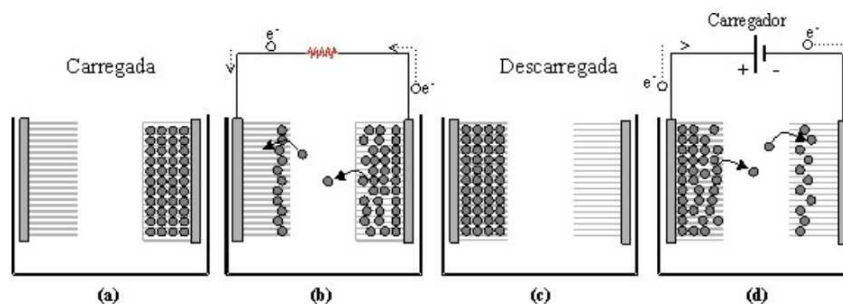
Nas baterias primarias as posições e funções do anodo e do catodo são fixas e bem determinadas, com os elétrons sendo doados pelo anodo e fechando o circuito elétrico no catodo. Já nas baterias secundárias esses papéis se invertem durante a carga, com o anodo fazendo o papel do catodo e esse fazendo o papel de anodo. O circuito interno da bateria é completado pelo eletrólito, esse faz a função de transportar os íons de um eletrodo para o outro,(BARROS, 2013)

Esses materiais se apresentam em diversas formas, podem ser líquidos ou sólidos. Nas células ainda se acrescentam os separadores que servem para manter os eletrodos afastados entre si, evitando curto-circuito e separam as reações entre os pares de eletrodos. Esses separadores devem manter um caminho para os íons evitando a interrupção do fluxo de corrente,(CAVALCANTE et al., 2005).

O ciclo de carga e descarga fica bem ilustrado na figura 16:

- a) Bateria totalmente carregada;
- b) Com o circuito fechado os elétrons saem do anodo para o catodo;
- c) O fluxo para quando não há mais transferência de elétrons entre os eletrodos;
- d) No carregamento, a introdução de uma corrente elétrica força os elétrons em sentido contrário fazendo com que o anodo e o catodo troquem de função.

Figura 16: processo de carga e descarga de uma bateria secundária



Fonte: (BARROS, 2013)

Agora que já foram apresentadas as características, componentes e princípio de funcionamento básicos de uma bateria secundária, será a próxima etapa será explicar as principais tecnologias em uso: Chumbo-Ácido (Pb-A's)e Íons de Lítio (Li-ion's) (CASTRO et al., 2013).

3.2 BATERIA CHUMBO-ÁCIDO

Sendo o primeiro projeto de bateria recarregável a ser empregado no uso cotidiano, as baterias chumbo-ácido, como a da Figura 17, foram inventadas pelo francês Gaston Planté no ano de 1859 (JONES et al., 2017). Inicialmente a capacidade era limitada pois os eletrodos de chumbo tinham pouco material passível de eletrólise, a partir de então foram implementadas diversas melhorias como mudanças na estrutura dos eletrodos, passando a ser compostos por uma malha de chumbo preenchida por um óxido de chumbo, aumentando o desempenho da célula por facilitar a troca de elétrons com o eletrólito. Em 1970 foi dado um grande passo com baterias que não necessitavam de manutenção e funcionavam em qualquer posição, embebendo os separadores em ácido (CARNEIRO et al., 2017).

Figura 17: Bateria de Gaston Planté



Fonte: (BARROS, 2013)

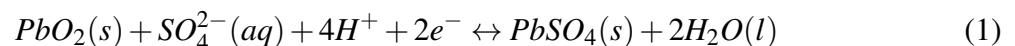
3.2.1 Princípio de Funcionamento

Após a submersão das placas positiva e negativa no eletrólito, que nesse tipo de bateria é o ácido sulfúrico, obtém-se como resultado a geração de uma tensão de aproximadamente 2,1 V por par de eletrodos, sendo associadas em série para se obter as tensões típicas de 12 V e 24 V em seus terminais.

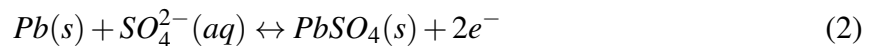
Então quando conecta-se a um circuito elétrico, surge uma corrente elétrica e após a descarga, estes elementos podem retornar as condições iniciais mediante uma recarga fazendo circular uma corrente elétrica no sentido contrário ao da descarga.

Nesse processo de descarga, o chumbo do material ativo das placas positivas (PbO_2) combina-se com os íons sulfato (SO_4^{2-}) do ácido sulfúrico, formando nas placas positivas o sulfato de chumbo ($PbSO_4$). Ao mesmo tempo, ocorre uma reação similar nas placas negativas onde o chumbo esponjoso (Pb) se combina com os íons (SO_4^{2-}) do ácido, formando também sulfato de chumbo o esquema da bateria é apresentado nas equações 1 e 2. Deste modo ambas as reações consomem o sulfato do ácido, fazendo com que haja cada vez menos ácido sulfúrico na solução, portanto, quanto mais descarregada estiver uma bateria menor será sua densidade. À medida que a energia elétrica se esgota, a tensão da célula diminui, pois, o ácido sulfúrico é consumido para produzir o sulfato de chumbo e no processo de carga, ocorre a reação inversa (CARNEIRO et al., 2017).

Reação no catodo:



Reação no anodo:



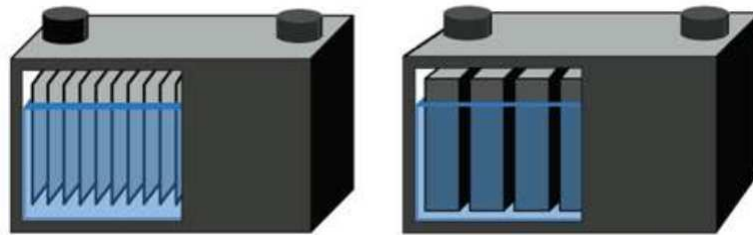
Durante o processo de carga as reações se invertem, porém nunca de forma completa, pois algumas moléculas não se recombinam, sendo assim, não voltam ao sistema (CARNEIRO et al., 2017). Segundo Linden (1995) e Pavlov (2011), outro fenômeno percebido é a liberação de gases resultantes da eletrólise da água conforme a tensão da célula fica maior que a tensão de maior do que a tensão de gaseificação (cerca de 2,39 V por célula) e as reações de sobrecarga começam, o carregamento então é limitado para que se evite o acúmulo de gases.

3.2.2 Características

As baterias elétricas do tipo chumbo ácido tem vários tipos de topologia. Como o uso em VE tem por princípio um ciclo intenso de carga/descarga, será descrita a arquitetura conhecida como bateria chumbo ácido de descarga profunda ou *deep-cycle*.

De acordo com Linden (1995) baterias chumbo-ácido *deep-cycle*, são projetadas para chegarem a um nível de carga típico de 20%, ou seja, para suportarem uma profundidade de descarga de 80%. Para tanto são necessárias algumas adaptações como visto na Figura 18. As espessuras das placas positivas são bem maiores que nos modelos tradicionais, isso se deve ao desgaste de material que o eletrodo sofre durante o processo de descarga que não é totalmente recuperado durante a recarga, assim formando um material de fundo na bateria. Nos eletrodos negativos há um processo de expansão da placa, sendo assim os espaçadores desse tipo de bateria são feitos de materiais que podem ser comprimidos (CARNEIRO et al., 2017).

Figura 18: Esquema de baterias chumbo-ácido. a) tradicional; b) *deep-cycle*

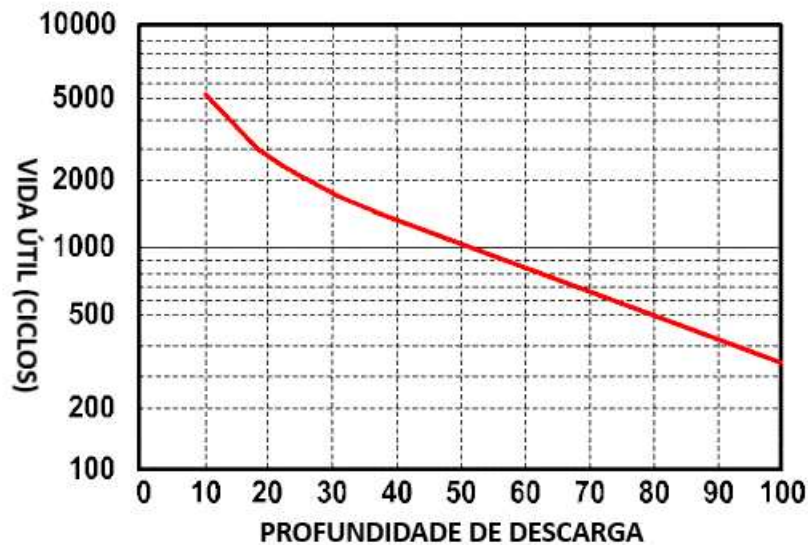


Fonte: (BARROS, 2013)

Como foi explicado o processo de descarga e carga da bateria acarreta em desgaste do eletrodo positivo e perda de material ativo. Esse efeito é mais intenso conforme a profundidade de descarga empregada na bateria e esse efeito é acelerado ao se expor a bateria a grandes temperaturas de trabalho, seja pelo ambiente, seja pela retirada de altas correntes. Segundo a a profundidade de descarga com melhor custo benefício é a de 50% trazendo uma vida útil de 1000 ciclos, como mostra o gráfico da Figura 19 (REDDY, 2011).

Mesmo com a limitação dos ciclos de descarga, tem-se a vantagem de que as baterias chumbo-ácido não sofrem com o efeito de memória, ou seja, o estado de carga antes do descarregamento não influi no armazenamento de energia por um novo carregamento, como acontece com as baterias de tecnologia Ni-Cd, que precisam ser totalmente descarregadas para se iniciar um novo ciclo de carregamento (BARROS, 2013).

Figura 19: Ciclo de vida de uma bateria chumbo-ácido por profundidade de descarga



Fonte: (BARROS, 2013), adaptado.

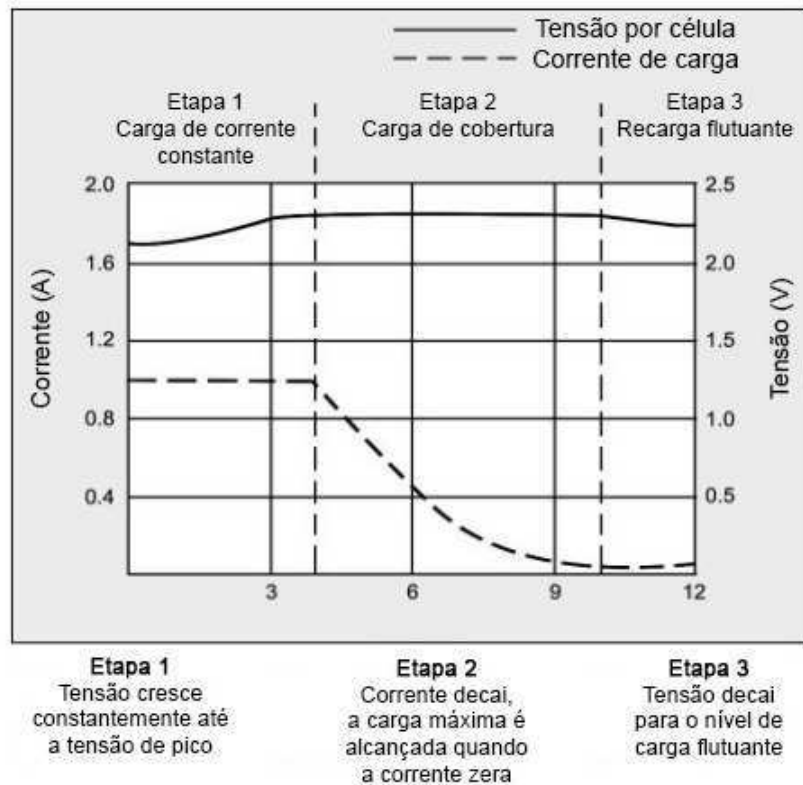
Por outro lado como esse tipo de bateria foi projetado para trabalhar em grandes profundidades de descarga e em princípio por maiores períodos de tempo que os modelos tradicionais de baterias chumbo ácido, sua estrutura não comporta grandes picos de corrente de saída, sendo imposta a mesma limitação para a sua recarga não sendo permitida uma recarga por correntes muito altas. A Figura 20 ilustra as etapas de recarga (BARROS, 2013).

Segundo Barros (2013), o processo de carga ocorre em três estágios:

1. Recarga em massa: a corrente é enviada para as baterias na taxa máxima de segurança até que a tensão aumente para próximo do nível de carga total, usualmente valores entre 80% e 90% essa transição ocorre de acordo com o limite de tensão escolhido, sendo limitado pela tensão de gaseificação onde ocorre a eletrólise da água (REDDY, 2011). A escolha de um limite de baixa tensão protege a bateria, mas isso produz um desempenho ruim e causa um acúmulo de sulfato no eletrodo negativa. Um limite de alta tensão melhora o desempenho, mas forma a corrosão da grade na placa positiva. Embora a sulfatação possa ser revertida se for atendida a tempo, a corrosão é permanente. Tipicamente esses limites de tensão ficam entre 10,5 V e 15 V (BARROS, 2013);

2. Recarga de tensão constante: a tensão permanece constante e a corrente diminui gradualmente à medida que a resistência interna aumenta durante o carregamento (REDDY, 2011). A resistência interna sobe gradualmente porque há cada vez menos sulfato de chumbo para ser convertido de volta à carga completa normal (CARNEIRO et al., 2017). Aqui o

Figura 20: Ciclo de carregamento de uma bateria chumbo-ácido



Fonte: (BARROS, 2013)

carregador chega ao máximo e a bateria tem sua carga nominal. Tipicamente esses limites de tensão chegam a 15,5 V. A bateria é considerada totalmente carregada quando sua corrente de carga chega a níveis de 3% a 5% de sua classificação em Ah (BARROS, 2013);

3. Recarga de cobertura: depois que as baterias atingem carga total, a tensão de carregamento é reduzida para impedir a produção de gás e prolongar a vida útil da bateria (REDDY, 2011). Sendo também conhecido como carga lenta, pois seu objetivo é evitar a descarga, mantendo a bateria com carga total. Tipicamente esses limites de tensão ficam entre 12,8 V e 13,2 V (BARROS, 2013).

3.3 ÍONS DE LÍTIO

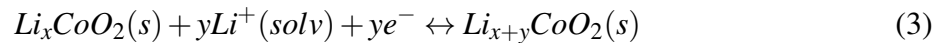
Segundo Barros (2013) e Reddy (2011) o trabalho pioneiro da bateria de lítio data de 1912 de autoria de G.N. Lewis, mas foi apenas nos anos 1970 que as primeiras baterias de lítio, até então não recarregáveis, se tornaram comercialmente disponíveis. As tentativas de desenvolver baterias de lítio recarregáveis seguiram nos anos 80, mas falharam devido a instabilidades no lítio metálico usado como ânodo, em contrapartida as baterias de lítio-íon

usam grafite como ânodo e materiais ativos no cátodo (JIANG; ZHANG, 2015). Em 1991 a *Sony Corporation* comercializou a primeira bateria Li-íon recarregável, embora com uma energia específica menor que a sua antecessora a Li-íon é segura, sendo hoje a tecnologia da bateria mais promissora dentre as atuais baterias (REDDY, 2011).

3.3.1 Princípio de Funcionamento

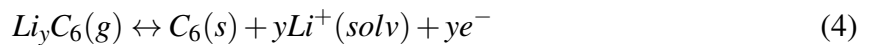
Neste tipo de bateria são utilizados íons de lítio no eletrólito na forma de sais de lítio dissolvidos sempre em solventes não aquosos. Os eletrodos são formados, geralmente, por compostos de estrutura aberta, denominados compostos de intercalação (LINDEN, 1995). O catodo é composto, geralmente, de um óxido de estrutura lamelar, sendo o óxido de cobalto litiado ($Li_xCoO_2(s)$) utilizado. Assim esse material se torna estável e com boa densidade de energia (PESQUERO et al., 2008).

A reação do catodo é mostrada na equação 3:



No anodo, geralmente composto de grafite, uma vez que esse material além de apresentar uma estrutura em forma de lâminas, é capaz de intercalar reversivelmente os íons lítio sem alterar significativamente a sua estrutura. Garantindo uma boa longevidade em ciclos de carga-descarga para o material (PESQUERO et al., 2008).

A reação do anodo é mostrada na equação 4:



Nas equações 3 e 4 as incógnitas x e y são números naturais, mostrando que mais de um átomo de lítio pode se envolver na reação (PESQUERO et al., 2008).

3.3.2 Características

As baterias de lítios-íon provam-se a tecnologia mais promissora para armazenamento de energia elétrica. Com uma tensão que pode chegar entre 3,6 V e 4,0 V por célula e sendo mais leves, essas baterias precisam de uma quantidade menor de células e em consequência um espaço e peso menores para atender uma carga, em comparação com as outras tecnologias (PESQUERO et al., 2008). Por esses motivos, esta é a tecnologia atualmente a tecnologia mais

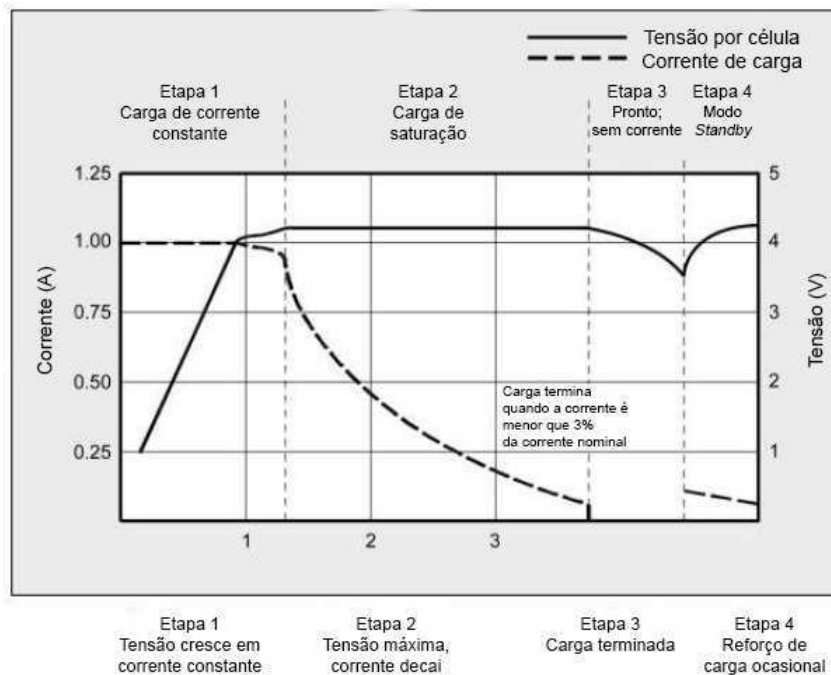
usada para a alimentação de VE's (REDDY, 2011).

Outra vantagem dessa tecnologia é que ela possui a menor necessidade de manutenção, não sofre com efeito memória e auto descarregamento severo, como as baterias Ni-MH e não necessita de ciclos de carga e descarga periódicos para manter a sua eficiência. Além disso sua curva de descarga quase plana ajuda no uso mais eficiente da energia armazenada na célula (JIANG; ZHANG, 2015).

Embora esse tipo de célula seja muito atrativo, não é livre de defeitos. Os bancos de baterias precisam de monitoramento célula a célula, com controle de tensão e temperatura, uma vez que valores muito acima ou abaixo do padrão tendem a facilitar o acúmulo de lítio metálico na célula, o que pode gerar instabilidade, podendo gerar aumento de calor por conseguinte acidente (TRINDADE, 2006) e (PESQUERO et al., 2008).

A Figura 21, ilustra os estágios de carregamento de uma célula lítio-íon.

Figura 21: Ciclo de carregamento de uma bateria Li-íon.



Fonte: (BARROS, 2013)

Segundo Barros (2013) o processo de carga ocorre em quatro estágios, com funções bem similares aos estágios de carregamento da bateria chumbo-ácido:

1. É aplicada uma tensão crescente até o valor ideal, e a corrente é mantida constante, durante o tempo de 1 a 2 horas, nesse ponto a bateria já completou cerca de 80% de sua carga (REDDY, 2011);

2. A tensão da célula é mantida constante e a corrente é gradualmente diminuída, aqui a carga se dá de forma mais suave, assim os valores de tensão são mantidos dentro dos limites de segurança da célula até a carga estar completa. Ao final dessa etapa, ou seja, em torno de 4 horas do início do processo, a bateria, caso ainda conectada, passará para o terceiro estágio (REDDY, 2011);

3. Com a carga completa a bateria fica sem ser submetida a corrente de carregamento, uma vez que as baterias Li-íon não devem absorver sobrecarga. Caso a tensão nos terminais caia abaixo do padrão especificado a bateria entra no estágio 4 (BARROS, 2013);

4. Essa etapa de carregamento acontece com uma corrente relativamente baixa, visando completar a carga que foi perdida pelas resistências internas e consumida pelo circuito de controle (BARROS, 2013).

Essas baterias não devem sofrer ciclos de carga e descarga com valores de corrente maiores que a sua classificação C, que é a corrente de que expressa a capacidade de uma bateria. Por exemplo, uma célula com 2.400 mAh só pode ser carregada e descarregada com correntes de no máximo 2.400 mA. Nesse caso, forçar uma carga muito rápida, nesse caso, aplicar uma carga superior a 2.400 mA causa superaquecimento e sobretensão desnecessária (REDDY, 2011). Para uma carga rápida ideal, a maioria dos fabricantes recomenda uma taxa C de 0,8 C ou cerca de 2.000 mA no exemplo aplicado (BARROS, 2013).

3.4 COMPARATIVO ENTRE TECNOLOGIAS DE BATERIAS

Na tabela 1, estão apresentadas informações que serão usadas no trabalho de comparação das tecnologias de baterias acima apresentados. Foi incluída na tabela a tecnologia de Hidreto Metálico de Níquel (Ni-MH) para efeito de comparação, por se tratar de uma tecnologia intermediária porém que em sendo deixada de lado tendo em vista alguns problemas como auto descarga e efeito memória.

A partir dos dados da tabela 1, pode-se observar as particularidades de cada bateria. Para direcionar a comparação, pode-se identificar alguns aspectos importantes para a aplicação em veículos elétricos, tal como: peso, preço, recarga e perdas.

As baterias de lítio-íon apresentam a melhor relação entre energia armazenada e peso, sendo 33% maior em comparação com as de Ni-MH e 220% maior que as de chumbo-ácido. Essa diferença no peso do banco de baterias se estende para outros fatores como robustez da carroceria, sistemas de freios mais simples, maior espaço interno, todos esses fatores afetando

o peso total do veículo e com isso a eficiência do mesmo.

Quando se considera a resistência interna, que gera perda da eficiência da bateria, nota-se que a bateria de chumbo ácido possui o menor valor, porém a bateria Li-íon não fica muito distante. Desconsiderando os valores referentes ao circuito de proteção, a bateria de Li-Íon fica com um valor superior, uma vez que seu circuito colabora com o valor de 100 mW (BARROS, 2013), logo o circuito da bateria fica em média com 100 mW, igualando o desempenho das baterias chumbo ácido.

Tabela 1: Comparativo entre tecnologias de baterias.

| Tecnologia da bateria | Chumbo -Ácido (deep cycle) | Ni-MH | Lí-Íon |
|---|-------------------------------|---|--|
| Densidade de Energia (Wh/kg) | 30-50 | 60-120 | 110-160 |
| Resistência Interna (mΩ) (incluindo circuitos periféricos) | <100 | 200-300 | 150-250 |
| Ciclo de Vida (até 80% da capacidade total) | 500-600 | 300-500 | 500-1000 |
| Tempo de Recarga Normal (horas) | 8-16 | 2-4 | 2-4 |
| Tempo de Recarga Rápida (horas) (até 80% da capacidade total) | não suporta | 1 | 0,5 |
| Tolerância a sobrecarga | Alta | Baixa | Muito baixa |
| Auto descarga por mês (CNT)(%) | 5 | 30 | 10 |
| Tensão Nominal por Célula (V) | 2 | 1,25 | 3,6 |
| Temperatura de Operação em Descarga (° C) | -20~60 | -30~75 | 0~60 |
| Manutenção | de 3 a 6 meses | de 60 a 90 dias | não necessita |
| Preço US\$ (jun./2019) | US\$ 90,00 (PS-12400NB) | US\$ 278,00 40x (Tenenergy 1,2V 10Ah) | US\$ 169,00 (CODDWATTSAMP 12 V 40Ah) |
| Preço por ciclo (jun./2018) | 0,15 | 0,56 | 0,17 |

Fonte: Adaptado de (YILMAZ; KREIN, 2012)

No tocante aos preços a bateria Li-íon tem mostrado um barateamento gradual, sendo hoje mais barata que as baterias Ni-MH, essas por sua vez ainda ocupam mais espaço. Quando se compara o valor por vida útil em ciclos, o resultado mostra preços ainda mais baixos, comparáveis aos da bateria chumbo-ácido, esse fator associado ao baixo índice de manutenção da bateria lítio-íon faz com que essa fique ainda mais competitiva.

Outro ponto a se destacar é o carregamento rápido que na bateria Li-íon dura 30

minutos, as Ni-MH precisam do dobro de tempo e as chumbo-ácido não possuem a opção de carregamento rápido, sendo que sua carga normal dura 8 horas.

Por esses motivos se pode concluir que as baterias mais adequadas ao uso em VE são as baterias Li-íon, mesmo necessitando de um controle mais intenso e aparentando em valor inicial mais elevado. Então se faz necessário um carregador que cumpra as suas exigências e tenha um bom controle tensão e corrente, pois as baterias de Li-íon são muito sensíveis a sobrecarga e uma vez que o controle de carregamento das mesmas é feito uma a uma um carregamento desequilibrado pode facilmente causar a queima de uma célula, comprometendo assim o desempenho do banco de baterias.

3.5 CARREGADORES VEICULARES

Os carregadores compõem o elo entre um VE e a rede elétrica, sendo de suma importância para o desempenho do veículo. Os carregadores devem ser eficientes, confiáveis, leves, não ocupar muito espaço e ter baixo custo, além de fornecer alta densidade de tensão, principalmente quando se fala de carregadores *onboard*, outro aspecto a ser levado em conta é o impacto proveniente da eletrônica do carregador na rede elétrica, sendo assim o carregador deve ser projetado de forma a diminuir o impacto de harmônicos e ter um bom fator de potência e deslocamento (YILMAZ; KREIN, 2012).

O controle do carregador pode ser implementado de várias formas, como por exemplo, através de controladores analógicos, microcontroladores, processadores de sinais digital e circuitos integrados específicos, dependendo sobre a classificação, custo e tipos de conversores. O aumento da complexidade e nível de energia, exigem um controle mais refinado e componentes mais robustos, esse fato afeta o custo do carregador (BARROS, 2013).

A maioria dos carregadores de VE possuem carregadores alinhados aos níveis de carregamento 1 e 2 adiante explicados, que exigem menor nível de energia. Carregadores trifásicos multinível bidirecionais são mais adequados para nível 3 de carregamento, fornecendo energia com alta qualidade, pouca distorção harmônica e ruído, sendo indicado para estações de carregamento (BARROS, 2013).

Existem vários tipos de topologia, tanto de carregadores monofásicos quanto trifásicos. Segundo Yilmaz e Krein (2012), os carregadores para veículos elétricos são classificados de acordo com: os níveis de energia, tempo de recarga, local de instalação, custo, efeito sobre a rede. Sendo separados em 3 níveis: um, dois e três, de acordo com o tempo de recarga.

3.5.1 Nível 1

Essa forma de carregamento é o método mais lento, usando entradas de energia monofásicas padrão, 127V 20A, com aterramento, por isso nenhuma infraestrutura adicional é necessária.

O impacto na instalação desse tipo de carregador é mínimo, uma vez que a potência exigida é baixa, porém é requerida por um tempo considerável- acima de 6 horas. Podendo ser usado em vagas tanto no trabalho quanto em casa, em momentos de ócio do veículo. Esse comportamento pode gerar picos de demanda no sistema, em contrapartida pode ser recarregado na madrugada momento de baixa demanda do sistema (YILMAZ; KREIN, 2012). Essa conexão pode ser feita por um conector J1772 a ser explorado no capítulo 3.5.5. Este conector tem como objetivo padronizar os métodos de carregamento, em sua estrutura comporta uma série de conexões com diferentes funções (YILMAZ; KREIN, 2012).

O custo de uma infra-estrutura residencial e de um carregador de nível 1 é relatado entre US\$ 150 a US\$ 200 (valores jun 2019) embora em geral, os veículos já possuem esse carregador integrado e como não necessita de alterações de estrutura, esse custo pode ser zerado, sendo necessário somente o cabo para conexão ao ponto de carregamento (YILMAZ; KREIN, 2012).

3.5.2 Nível 2

Os carregadores que trabalham com esse padrão de carregamento são os mais utilizados, sendo considerado um intermediário entre o carregamento mais lento e o mais rápido (YILMAZ; KREIN, 2012).

Nesse nível a tomada de energia é feita em até 240 V / 80 A com aterramento, porém é necessária uma estrutura dedicada, inviabilizando o uso de uma tomada de uso geral ou específico que ficam limitadas a 20 A.

O carregamento é feito de forma mais rápida, sendo assim exige mais potência por menos tempo, o que gera um impacto na rede maior, com uma potência de 19,2 kW, picos de demanda podem surgir durante os carregamentos simultâneos de veículos.

O valor para ser investido na instalação já é superior ao Nível 1, graças aos componentes e controle por trás desse tipo de carregador que devem suportar e gerir uma maior quantidade de energia e por exigir uma estrutura dedicada para o carregamento. Os custos ficam entre US\$ 400 e US\$ 800 (valores jun 2019) (YILMAZ; KREIN, 2012).

3.5.3 Nível 3

Esse protocolo de recarga é ideal para uso comercial, se reservando a locais onde uma recarga rápida (com menos de 1 hora) seja um atrativo, como estabelecimentos comerciais ou em postos de recarga, um paralelo com os postos de combustíveis (BARROS, 2013).

Esse padrão dificilmente será implantado em residências, uma vez que os custos para manter uma rotina de recarga tão rápida são muito altos, girando entre US\$ 19.000 e US\$ 39.000 (valores jun 2019), além dos gastos com manutenção da estação de recarga (YILMAZ; KREIN, 2012).

Este sistema trabalha tipicamente com tensões trifásicas de 480V e requer um carregador com conversão regulada de corrente alternada para contínua (AC/CC) externo ao veículo que será alimentado diretamente em DC. Por isso o conector SAE J1772 recebe uma estrutura adicional que comporta dois pinos destinados a corrente contínua nos valores altos a serem utilizados, sendo denominado como Conector SAE J1772 Combo. (YILMAZ; KREIN, 2012).

3.5.4 Comparativo Carregadores

Tabela 2: Níveis de potencia de carga

| Níveis de potencia de carga. | | | | | | |
|---|---|--|--|---|----------------------|--|
| Níveis | Carregador | Local de carga | Fonte de Energia | Nível de Potência | Tempo de Recarga | Tecnologia do Veículo |
| Nível 1 (oportunidade) 120Vca 240Vca | No veículo; Monofásico | Em casa ou no trabalho | Tomada de Uso Geral (TUG) | 1,4kW (12A) 1,9kW (32A) | 4-11h 11-36h | VEHP (5-15kWh) VE (16-50kWh) |
| Nível 2 (Primário) 240Vca 400Vca | No veículo; Monofásico ou Trifásico | Em tomadas privadas ou postos públicos | Tomada de Uso Específico (TUE) | 4kW (17A) 8kW (32A) 19,2kW (80A) | 1-4h 2-6h 2-3h | VEHP (5-15kWh) VE (16-30kWh) VE (3-50kWh) |
| Nível 3 (Recarga Rápida) 208-600 Vca ou Vcc | Externo ao veículo; Trifásico | Estabelecimento Comercial | Tomada de Uso Específico, Trifásica | 50kW 100kW | 0,4-1h 0,2-0,5h | VE (20-50kWh) |

Fonte: Adaptado de (YILMAZ; KREIN, 2012)

Na tabela 2, nota-se as características que levam o nível 2 se tornar tão atrativo: esse protocolo diminui o tempo significativamente em relação ao nível 1, tornando uma carga viável em intervalos pequenos bem como o carregamento nível 3, porém o protocolo nível 3 exige uma demanda muito maior da rede elétrica. Por esse motivo os protocolos de carregamento nível 2 e 3 podem ter uma consequência significativa no sistema de energia, uma vez que eles impõem grande demanda à rede em momentos onde vários veículos estejam sendo recarregados (YILMAZ; KREIN, 2012) e (ARAUJO; EICHENBERGER, 2015).

Na tabela 03 estão discriminados alguns veículos, suas características do seu sistema de recarga.

Tabela 3: Características de Carga e Infraestrutura de Alguns Veículos Elétricos

| Características de Carga e Infraestrutura de Alguns Veículos Elétrico | | | | | | |
|---|---------------------|-----------------------|------------------------------|------------------------------|---------------------|-------------|
| Modelo | Toyota Prius (VEHP) | Chevrolet Volt (VEHP) | Mitsubishi i-MiEV (VE) | Nissan Leaf (VE) | Tesla Roadster (VE) | |
| Tipo da Bateria; Energia Acumulada | Li-Íon 4,4 kWh | Li-Íon 16 kWh | Li-Íon 16 kWh | Li-Íon 24 kWh | Li-Íon 53 kWh | |
| Autonomia em Ciclo Elétrico | 22,5 km | 64,4 km | 154,5 km | 161 km | 394,5 km | |
| Tipo de Conector | SAE J1772 | SAE J1772 | SAE J1772 JARI/ TEMPCO | SAE J1772 JARI/ TEMPCO | SAE J1772 | |
| Nível 1 | Demanda | 1,4 kW (120V) | 0,96-1,4 kW | 1,5 kW | 1,8 kW | 1,8 kW |
| | Tempo de Recarga | 3h | 5-8 h | 14 h | 12-16 h | >30 h |
| Nível 2 | Demanda | 3,8 kW (120V) | 3,8 kW | 3 kW | 3,3 kW | 9,6-16,8 kW |
| | Tempo de Recarga | 2,5 h | 2-3 h | 7 h | 6-8 h | 4-12 h |
| Nível 3 | Demanda | N/E | N/E | 50kW | >50kW | N/E |
| | Tempo de Recarga | N/E | N/E | 0,5 h | 0,25- 0,5h | N/E |

Fonte: Adaptado de (YILMAZ; KREIN, 2012)

Nessa tabela pode-se confirmar a hegemonia do uso de baterias Li-íon pelos modelos de VE mais modernos. Notar-se que nem todos os modelos tem suporte para carregadores nível 3 (apesar dos modelos Tesla possuírem um supercarregador específico), bem como as diferenças de tempo de carregamento entre os protocolos de níveis diferentes. Fica evidente também o grande alcance dos carregadores nível 2, por estarem bem disseminados e oferecerem recargas em tempos significativamente menores, na maioria dos casos, metade do tempo dos carregadores nível 1 (YILMAZ; KREIN, 2012; DELGADO et al., 2017).

3.5.5 Norma SAE J1772

A norma SAE J1772 dita as características do conector usado na recarga do veículo, sendo usado para os 3 níveis de recarga. Com o uso dessa norma pretende-se criar um padrão definindo questões físicas, elétricas, protocolos de comunicação e requerimentos de performance para os conectores físicos de recarga de veículos elétricos. O conector proposto pela norma SAE J1772 está exemplificado na figura 22.

Figura 22: SAE J1772 Combinado



Fonte: (BARROS, 2013)

Outro ponto que a norma indica é a localização do carregador, onde para os níveis 1 e 2 ele pode estar localizado no próprio veículo, porém para o nível 3 é obrigatório que esse carregador seja externo, como questão de segurança uma vez que são exigidos altos níveis de potência no carregamento (YILMAZ; KREIN, 2012).

3.5.6 Direcionalidade do carregador

Os carregados usados nos VE podem ter dois regimes de fluxo. Podem ser unidirecionais, mais simples, como conversores de apenas um nível em ponte e menos parâmetros monitorados, usado apenas para carregar o banco de baterias do VE. Em contrapartida podem ter regime bidirecional, podendo utilizar a bateria como um acumulador temporário fornecendo a energia do veículo para a rede, sistema conhecido como “*vehicle to grid*” (V2G).

Esses carregadores, possuem eletrônica bem mais sofisticada e funções para monitoramento não somente do estado de carga das baterias, como grande parte dos dispositivos de segurança de um inversor para geração distribuída, como será explicado adiante, necessitando de um seguidor de sinal de rede, sistema de anti-ilhamento, para o uso em horários de pico esses parâmetros devem poder ser setados no controlador, porém o uso desses veículos no regime V2G comprometem a vida útil da bateria, uma vez que expõem o banco de baterias a mais ciclos de carga-descarga (YILMAZ; KREIN, 2012).

Como foi mostrado existem vários tipos de carregadores e protocolos de carregamento

que podem ser aplicados a VE's. A escolha do carregador mais adequado depende do regime de uso, infraestrutura e nível de automação aplicado ao carregamento, sendo o mais difundido o carregamento nível 2 por exigir menor adaptação de infraestrutura que o nível 3 e velocidades de recarga superiores ao carregamento nível 1, sendo bem utilizado onde veículos possam ser recarregados durante a noite ou durante o expediente e onde os períodos de parada sejam menores, como estacionamentos de shoppings, por exemplo.

No caso do Pompéo, por se tratar de um protótipo e por limitações de infraestrutura, são usadas 4 baterias Pb-A 12V e 64 Ah, associadas a um carregador de nível 1, as interações entre essas tecnologias serão discutidas posteriormente no capítulo 6.

4 SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

Os sistemas fotovoltaicos têm se mostrado uma alternativa interessante no que se refere a geração de energia descentralizada, sendo uma alternativa para alívio de picos de demanda e uso local de energia. Esse tipo de modal pode ser usado para gerar parte da energia necessária para o carregamento do VE Pompéo produzindo tal energia foi acumulando créditos para serem usados no carregamento. Podendo gerar parte ou a energia para o carregamento como um todo.

4.1 ENERGIA SOLAR

O Sol é a fonte primária de quase toda a energia da Terra, sendo responsável pela evaporação que alimenta o ciclo de chuvas que abastecem as hidrelétricas, correntes de vento para as turbinas eólicas e por sustentar a vida dos seres que viriam a se tornar a base dos combustíveis fósseis (PINHO; GALDINO, 2014). É fácil constatar que em algumas horas de exposição, o Sol fornece mais energia que o consumido pela humanidade em um ano (RÜTHER, 2004). É essa radiação que alimenta os dispositivos fotovoltaicos, ou seja, módulos fotovoltaicos buscam a energia em sua fonte primária.

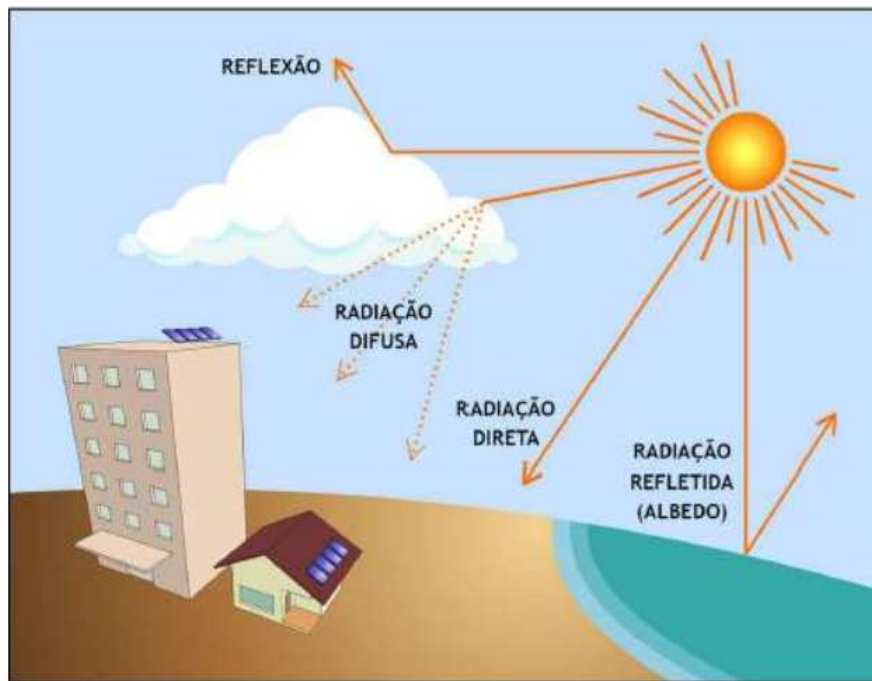
Mesmo parecendo uma fonte de energia inesgotável em um primeiro momento, a energia fotovoltaica apresenta limitações inerentes de sua fonte de energia. Essa fonte sofre com a intermitência, uma vez que não há disponibilidade no período noturno e a sazonalidade constantemente muda o ângulo de incidência dos raios solares nos módulos. Com o movimentos de translação e rotação, a quantidade de energia que chega ao solo terrestre varia ao longo do ano (PEREIRA et al., 2017).

Nesse contexto, para o melhor aproveitamento dessa energia, são necessários estudos visando a identificação do potencial energético da localidade em que será implantado o projeto, para tanto é necessário o conhecimento de alguns conceitos que serão apresentados a seguir.

4.1.1 Radiação

A radiação solar é a energia proveniente do Sol que chega à Terra pela propagação de ondas eletromagnéticas (VILLALVA G M E GAZOLI, 2012). Ao chegar na atmosfera, parte dela é absorvida. Da parte que não é absorvida, uma chega ao solo sem ser desviada e é conhecida como radiação direta. A parte que é desviada, seja por partículas de poeira ou gases presentes na atmosfera, além de água em suspensão que vai de pequenas gotículas até nuvens, essa parte é conhecida como radiação difusa. Mesmo em dias ensolarados se estima que 20% da energia que atinge a superfície é difusa. Há ainda a parte que chega ao solo, ou nos objetos do entorno, depois é refletida na direção da superfície em estudo, essa parte é conhecida como radiação devido ao albedo (PEREIRA et al., 2017). Pode-se ver essas diferentes categorias na Figura 23.

Figura 23: Componentes da radiação solar



Fonte: (URBANETZ, 2010)

4.1.2 Irradiância

Para se estudar os efeitos da radiação deve-se ter como base o fluxo de potência (radiação) que chega em uma área padrão. O valor médio de irradiância na superfície terrestre, também conhecida como constante global, é de 1000 W/m. Esse valor é tido como padrão para testes e avaliação de células e módulos fotovoltaicos (PEREIRA et al., 2017). Segundo a

(ABNT, 2006), outra definição que pode se tomar é a da norma NBR 10899, intitulada: Energia solar fotovoltaica – Terminologia (NBR, 20013). Essa norma apresenta além do conceito de irradiação, outros conceitos importantes e suas abreviações, como apresentados a seguir:

- **Irradiância solar (G)** - Taxa na qual a radiação solar incide em uma superfície por unidade de área, normalmente medida em watt por metro quadrado [W/m^2];
- **Irradiância direta (GDIR)** - Irradiância solar incidente em uma superfície sem ter sido espalhada pela atmosfera, podendo ser horizontal ou normal;
- **Irradiância difusa (GDIF)** - Potência radiante do céu recebida em uma unidade de área em uma superfície horizontal, excluída a irradiância direta;
- **Irradiância global (GHOR)** - Potência radiante solar recebida em uma unidade de área em uma superfície horizontal, que é igual à irradiância direta mais a irradiância difusa;
- **Albedo (GALB)** - Índice relativo à fração da energia radiante solar recebida em uma unidade de área devido à refletância dos arredores e do solo onde está instalado um dispositivo;
- **Irradiância total (GTOT)** - Potência radiante solar total com as componentes direta, difusa e de albedo, recebida em uma unidade de área em uma superfície com inclinação qualquer (NBR, 20013).

4.1.3 Irradiação

Como foi exposto no tópico anterior, a radiação solar sofre variações diárias e sazonais. Desse modo, a simples aquisição de dados de irradiância em um momento qualquer não é suficiente para avaliar o fluxo de energia e validar um empreendimento, por exemplo. Sendo assim, é necessário integrar esses valores de irradiância por um tempo para poder traçar um perfil energético do local. Ao se fazer isso, tem-se o valor de irradiação naquele período, sendo expressa em (Wh/m^2) (PEREIRA et al., 2017). O prazo mínimo para um levantamento de irradiação ser considerado de boa precisão é de 10 anos de dados, uma vez que tempos de medidas mais curtos ficam sujeitos à ciclos de seca ou de alto índice pluviométrico (URBANETZ, 2010).

Assim como a irradiância, a definição da irradiação está prevista na norma da ABNT NBR 10899: 2006, bem como algumas outras definições apresentadas a seguir:

- **Irradiação solar (I ou H)** - Irradiância solar integrada durante um intervalo de tempo especificado, normalmente uma hora ou um dia, é

medida em watt hora por metro quadrado ou Joule por metro quadrado (Wh/m^2 ou J/m^2). É simbolizada por “I”, quando integrada em uma hora, e por “H”, quando integrada em um dia;

- **Irradiação direta** (IDIR ou HDIR) - Irradiância direta integrada durante um intervalo de tempo especificado;
- **Irradiação difusa** (IDIF ou HDIF) - Irradiância difusa integrada durante um intervalo de tempo especificado;
- **Irradiação global** (IHOR ou HHOR) - Irradiância global integrada durante um intervalo de tempo especificado;
- **Irradiação total** (ITOT ou HTOT) - Irradiância total integrada durante um intervalo de tempo especificado (NBR, 20013).

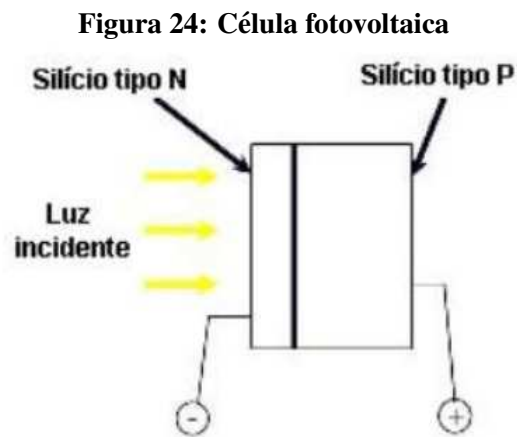
4.1.4 Efeito Fotovoltaico

As células fotovoltaicas são fabricadas com material semicondutor, ou seja, material com características intermediárias entre um condutor e um isolante. O material mais amplamente utilizado é o silício, dentre outros motivos por sua abundância na crosta terrestre. O cristal de silício puro possui estrutura tetravalente, ou seja, não possui elétrons livres e, sendo assim, é mal condutor elétrico. Para alterar isto acrescentam-se outros elementos. Este processo denomina-se dopagem (NASCIMENTO, 2004).

Aplicando fósforo como material de dopagem obtém-se um material com elétrons livres ou portadores de carga negativa (material tipo N). Por outro lado, realizando esse processo usando boro como material de dopagem, obtém-se um material com falta de elétrons ou portador de cargas positivas (material tipo P) (NASCIMENTO, 2004).

Segundo (MACHADO; MIRANDA, 2014), ao serem unidas, forma-se um campo elétrico devido aos elétrons livres do material tipo N que ocupam os vazios da estrutura do material tipo P. Ao incidir luz sobre a junção PN, os fótons chocam-se com os elétrons da estrutura do silício fornecendo-lhes energia e desfazendo um par elétron-lacuna. Devido ao campo elétrico gerado nessa junção, os elétrons fluem para a camada “N” e as lacunas para a camada “P” (sentido real da corrente). Ao se colocar um condutor externo entre essas camadas, fecha-se o circuito e por ele flui corrente elétrica, como mostrado na Figura 24.

Enquanto houver luz incidindo na célula, haverá corrente. A intensidade da corrente elétrica gerada variará em proporção à intensidade da luz incidente, ou seja, em proporção com a quantidade de fótons incidentes na junção PN. Este fenômeno é denominado “Efeito fotovoltaico” (MACHADO; MIRANDA, 2014).



Fonte: (NASCIMENTO, 2004)

4.2 TECNOLOGIA DE MÓDULOS

Todas as tecnologias de módulos se baseiam no efeito fotoelétrico, ou seja, na incidência de luz na junção PN de uma célula. Porém uma célula somente não produz potência suficiente sendo necessária a associação delas para a produção de energia. O material com que as células são constituídas, a forma como são associadas e até mesmo como os elétrons são coletados influenciam no desempenho dos módulos. Serão apresentadas as três tecnologias dominantes no mercado, juntas elas representam mais de 90% do mercado mundial, sendo elas: silício monocristalino, silício policristalino e a tecnologia de filmes finos, em especial telureto de cádmio. (URBANETZ JR, 2017).

4.2.1 Histórico

Em 1839, Edmond Becquerel, físico francês, observou que duas placas de latão imersas em um eletrólito líquido produziam eletricidade quando expostas à luz solar. Esse foi o primeiro passo na exploração da luz solar como fonte de energia, porém ainda com o intuito apenas demonstrativo (PINHO; GALDINO, 2014).

Em 1883, Charles Fritts construiu a primeira bateria solar, usando folhas de selênio. Apesar de ter taxa de conversão energética de 1% seu dispositivo teve muita repercussão, pois a única forma de gerar energia naquela época era a queima de combustíveis (VILLALVA G M E GAZOLI, 2012).

Ainda demorou 71 anos para que o conceito de célula composta de silício fosse aplicado em um modelo comercial. Em 1954 que os cientistas da *Bell Labs* construísem

a primeira célula usando esse conceito, a célula possuía eficiência de 6% e era usada para alimentar um transmissor de rádio (MACHADO; MIRANDA, 2014). Desde então, as pesquisas seguem diversos caminhos, primeiramente com o aproveitamento de silício e posteriormente com o aproveitamento de outros materiais como o telureto de cádmio por exemplo (MACHADO; MIRANDA, 2014).

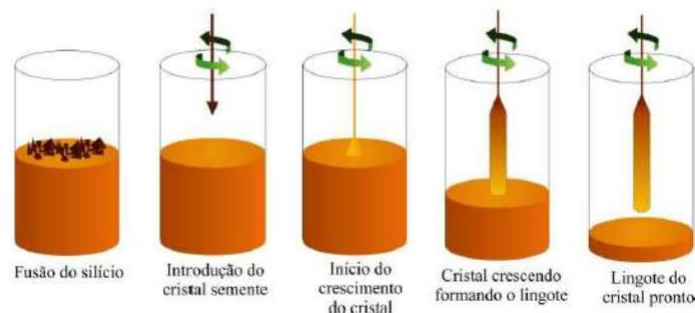
Observa-se hoje um crescente mercado, com a produção de alguns países com crescimentos anuais próximos a 100% a cada ano e novas aplicações e técnicas surgindo constante (TESKE et al., 2019). Nesse contexto serão apresentadas as tecnologias responsáveis pela maior parte do mercado mundial.

4.2.2 Silício monocristalino

As células de silício monocristalino (m-Si) são feitas a partir de um único cristal de silício em forma de lingote, esses lingotes são obtidos a partir do silício purificado, o qual é extraído do mineral quartzo que é muito abundante na crosta terrestre, porém para a fabricação de uma célula fotovoltaica, é necessário que o silício tenha uma pureza com grau de 99,9999% (RÜTHER, 2004).

Depois da purificação o silício é fundido e então um único cristal de silício, chamado de cristal semente, mergulhado no silício fundido, em um processo conhecido como processo de Czochralski. Nesse processo, o cristal semente é rotacionado enquanto é puxado pela haste. Durante o crescimento, o cristal recebe pequenas quantidades de boro formando um semiconductor dopado do tipo P como mostrado na Figura 25, assim ao final é formado um lingote de silício monocristalino do tipo P. A pureza do silício envolvido e a energia necessária para mantê-lo em estado líquido fazem com que esse processo seja bem custoso (MACHADO; MIRANDA, 2014).

Figura 25: Processo de Czochralski



Fonte: (MACHADO; MIRANDA, 2014)

O lingote é então fatiado para produzir os wafers de silício. Esses wafers são levados a um forno de difusão, onde recebe a altas temperaturas, a dopagem com fósforo, formando assim a junção PN que originam as propriedades fotovoltaicas (MACHADO; MIRANDA, 2014).

O wafer dopado então recebe o tratamento antirreflexivo, dando assim, origem à célula fotovoltaica. Uma célula monocristalina tem aspecto uniforme, podendo apresentar coloração azulada ou preta, dependendo do tipo de tratamento antirreflexivo empregado, outra característica da célula monocristalina é a sua forma de cantos arredondados, oriunda dos lingotes redondos produzidos pelo processo de Czochralski (MACHADO; MIRANDA, 2014).

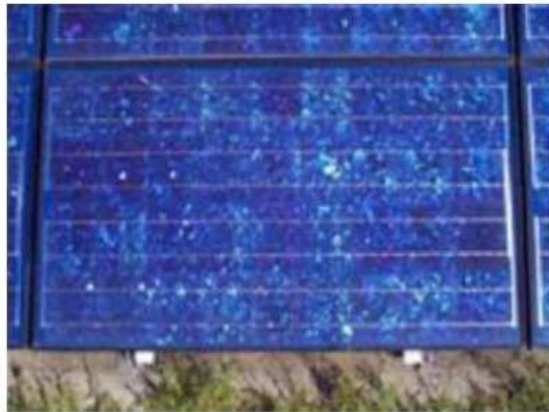
A célula pronta recebe uma grade metálica que servirá para a coleta dos elétrons gerados em sua parte frontal e uma camada metálica na parte posterior, além de uma pintura anti-reflexiva. Após isso as células são associadas em geral em um arranjo em série e recebe as camadas protetoras de EVA, um filme de fluoreto de polivinila (PVF) a parte traseira e um perfil de vidro com baixo teor de ferro na parte dianteira, além da moldura metálica.

Os módulos monocristalinos estão entre os modelos comerciais com a maior eficiência, hoje apresentando valores acima de 19% de taxa de conversão, porém esses módulos tendem a ser mais caros, por causa do custo de se produzir as células e por serem quebradiças e necessitarem de um encapsulamento mais robusto e cuidados em sua produção,(VILLALVA G M E GAZOLI, 2012).

4.2.3 Silício policristalino

A fabricação da célula de silício policristalino (p-Si) se difere das células de m-Si por não precisarem passar pelo processo de Czochralski. O silício derretido derramado em um recipiente, muitas vezes já sendo um recipiente com forma de paralelepípedo, assim evitando desperdícios inerentes a laminação da barra de silício, característicos das células monocristalinas. Em tudo mais a construção desses dois tipos de módulos é bem similar, o resultado é uma célula com vários cristais P orientados em direções diferentes, ilustrada na figura 26 (VILLALVA G M E GAZOLI, 2012).

Essa disparidade afeta o rendimento por criar superfícies de separação entre os cristais e isso afeta o rendimento, em contrapartida esses módulos não possuem os espaços típicos das células m-Si, sendo assim o seu rendimento é ligeiramente menor, girando em torno de 17% e é uma célula e conseqüentemente um módulo mais barato de se produzir fazendo com que essa tecnologia seja amplamente utilizada e tendo ganhado espaço no mercado nos últimos anos (TESKE et al., 2019; VILLALVA G M E GAZOLI, 2012).

Figura 26: Célula de p-Si

Fonte: (MACHADO; MIRANDA, 2014)

4.2.4 Filmes finos

A tecnologia de filmes finos surge como alternativa a tecnologia tradicional de fabricação de módulos alterando tanto matérias primas quanto estruturas. Outros elementos além do silício começaram a ser utilizados e quanto na estrutura algumas células, possuem uma camada de material sem dopagem (intrínseco) no meio da junção PN, fazendo assim uma junção PIN. Esses materiais são depositados por vários métodos, dentre eles o de vaporização, permitindo que a matéria prima se deposite no substrato evitando assim desperdício. Outro aspecto interessante são as temperaturas envolvidas na produção. Enquanto uma célula de filme fino necessita de temperaturas entre 200 °C e 300 °C, as células de m-Si e p-Si necessitam de temperaturas que chegam a 1500 °C. O resultado dessas alterações são filmes, altamente versáteis podendo ser aplicados em praticamente qualquer cobertura, com pouco desperdício de material e com *payback* competitivo, com módulos apresentando eficiência em torno de 15% (CdTe).

Existem duas tecnologias com participação expressiva no mercado e são o disseleneto de cobre índio e gálio (CGIS) e o telureto de cadmio (CdTe). Para efeito de comparação será usado o CdTe por se tratar da tecnologia mais promissora no mercado.

4.2.5 Comparativo entre tecnologias de módulos

Como foi mostrado por mais que todas as tecnologias supracitadas se baseiem no mesmo princípio, porém cada uma tem suas características próprias que serão apresentadas na Tabela 4 Comparativo entre tecnologias de módulos. Alguns conceitos serão apresentados seguindo a padronização da norma NBR 10899: 2006. Sendo usado

- **Corrente de curto – circuito** (I_{sc}) -Corrente de saída de um conversor fotovoltaico, na condição de curto-circuito e para valores preestabelecidos de temperatura e irradiância total;
- **Tensão de circuito aberto** (V_{oc}) -Tensão gerada através de um conversor fotovoltaico sem carga (aberto), para valores preestabelecidos de temperatura e irradiância total;
- **Condições padrão de referência para ensaio** (STC) - Temperatura de junção da célula em 25 °C, irradiância total de 1.000 W/m² normal à superfície de ensaio com espectro AM 1,5;
- **Potência de pico** (Wp) - Potência nominal de saída de um conversor fotovoltaico, sob as condições padrão de referência para ensaio (NBR, 20013).

Tabela 4: Comparativo entre tecnologias de módulos

| Comparativo entre tecnologias de módulos | | | |
|--|-------------|-------------|------------|
| Tecnologia | m-Si(335Wp) | p-Si(335Wp) | CdTe(85Wp) |
| Tensão por célula (V) | 0,6 | 0,5 | 0,4 |
| Corrente de curto (I_{sc}) (A) | 9,54 | 9,54 | 1,57 |
| Tensão de Circuito Aberto (V_{oc}) (V) | 44,3 | 45,8 | 87,6 |
| Potência de Pico (Wp) | 335 | 335 | 85 |
| Tensão Máxima (V) | 1000 | 1500 | 1500 |
| Peso (kg) | 20 | 22,40 | 12 |
| Eficiência (%) | 18,7 | 17,23 | 6,12 |
| Temperatura de Operação (°C) | -40~85 | -40~85 | -40~85 |
| Coefficiente de Temperatura (P_{max}) (%/°C) | -0,40 | -0,40 | -0,29 |
| Custo(US\$) (valores jun/2019) | 178,06 | 155,39 | 120,50 |

Fonte: (CANADIAN, 2019), (FIRSTSOLAR, 2018)

Os módulos de silício monocristalino e policristalino são disponibilizados em potências muito similares e tendo características muito próximas, excetuando pelo fato as células de m-Si produzirem uma tensão um pouco maior que a de p-Si. Em decorrência disso os módulos baseados em m-Si possuem em geral 60 células, enquanto os módulos p-Si chegam a 72 células e para uma potência menor os módulos CdTe, pode chegar a 216 células. (FIRST SOLAR, 2016) ;(CANADIAN, 2017); (SOLARIA, 2017)

Os custos das duas categorias se tratando apenas de módulos ficam bem similares, os módulos CdTe tem o custo mais elevado para uma mesma potência (R/Wp) além da área necessária para se conseguir um sistema com a mesma potência. Com os painéis CdTe necessitando de uma área significativamente maior.

À primeira vista pode-se pensar que os módulos CdTe possuem apenas desvantagens, porém esse fato não condiz com a realidade uma vez que eles são mais leves, necessitando de estruturas menos robustas para ancoragem, em alguns casos não necessitando de estrutura nenhuma pois seu substrato é adesivo e adere as estruturas de sustentação. Outra vantagem é o coeficiente de temperatura, que é definido pela taxa de rendimento perdida em relação ao rendimento nominal a cada acréscimo de 1 °C que chega a ser 70% do valor das outras tecnologias.

Pode-se perceber as especificidades de cada tecnologia e como cada uma tem seu ponto de aplicação. Para o uso como cobertura para uma vaga as tecnologias tradicionais baseadas em silício são mais indicadas por produzir uma quantidade de energia maior em relação a área utilizada.

4.3 SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

Para o aproveitamento da energia produzida pelos módulos fotovoltaicos, se fazem necessários o uso de diversos equipamentos que dependem tanto da carga a ser alimentada quando das condições da instalação. Se o sistema fotovoltaico é integrado à rede elétrica convencional ou isolado do sistema da concessionária de energia elétrica.

A NBR (2008), classifica os sistemas como sistemas fotovoltaicos isolados (SFI) e sistemas fotovoltaicos conectados à rede (SFCD), serão esses dois tipos de sistemas que serão abordados.

4.3.1 Sistemas Fotovoltaicos Isolados

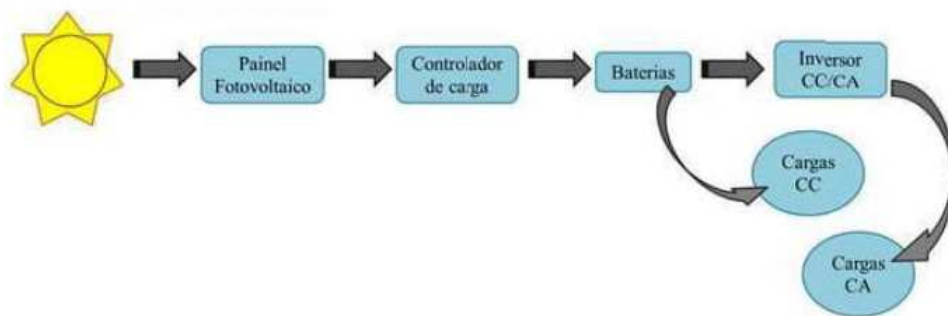
Esse tipo de sistema é normalmente usado para lugares onde a energia da rede elétrica (rede firme) não chega ou não é uma opção de carregamento como por exemplo, embargos ambientais onde a ocupação não é incentivada e sistemas com geração a diesel podem causar desconforto por poluição sonora.

Os SFI são usados como alternativa a grupos motogeradores a diesel, em comunidades ou consumidores isolados como fazendas ou vilas ribeirinhas. Outra aplicação é para aumentar a autonomia de dispositivos que necessitem de energia elétrica como veículos elétricos, barcos e outros veículos. Podendo ser aplicado tanto o chassi dos veículos como em estações de carregamento onde não haja interação com a rede (VILLALVA G M E GAZOLI, 2012).

Sua topologia é bem mais complexa que a dos sistemas conectados à rede, como

mostrado na Figura 27 uma vez que em princípio toda a energia gerada vai para controlador de cargas que garantirá que os níveis de energia mínimos e máximos do banco de baterias não sejam ultrapassados – para baterias chumbo ácido esse valor máximo fica ente 14,5 V e 15,5 V. Caso o banco esteja totalmente carregado a energia passa do controlador diretamente para as cargas. A energia volta a ser fornecida pelas baterias assim que os módulos não gerarem energia suficiente para sustentar o consumo das cargas (VILLALVA G M E GAZOLI, 2012).

Figura 27: Sistema fotovoltaico isolado.



Fonte: (MACHADO; MIRANDA, 2014), adaptado.

Segundo Villalva G M e Gazoli (2012), caso existam cargas em corrente alternada, a energia das baterias é direcionada a um inversor. O inversor é um equipamento eletroeletrônico responsável pela conversão da energia de corrente contínua (CC) dos módulos fotovoltaicos em energia de corrente alternada CA a ser disponibilizado para as cargas a serem alimentadas. A tensão CA de saída deve ter amplitude, frequência e conteúdo harmônico adequado às cargas a serem alimentadas e a tensão de saída do inversor deve ser sincronizada com a tensão da rede, no caso de sistemas conectados à rede elétrica. De acordo com tipo do sistema fotovoltaico, conectado à rede elétrica ou isolado, escolhe-se o inversor a ser usado (URBANETZ, 2010).

Esses sistemas podem ser muito versáteis e trazerem vantagens em relação a outros tipos de fontes complementares, como diesel, ele possui grandes pontos de perda uma vez que grande parte de sua energia é guardada em baterias - em geral de chumbo ácido – o que provê uma perda de 20% de energia inerente a esse tipo de armazenamento de energia. Além disso o banco de baterias deve ter uma carga que suporte o descarregamento por períodos quando se imagina que não haja irradiação direta ou que ela esteja muito prejudicada. Outro ponto a ser discutido é o dimensionamento dos módulos, que tendem a ser superdimensionados para aproveitar o pior cenário de carga no inverno (URBANETZ, 2010).

Essas limitações restringem as aplicações desse tipo de sistema fotovoltaico, para outras situações são usados sistemas fotovoltaicos conectados à rede (SFCR).

4.3.2 Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede

Esse tipo de sistema tem por objetivo a geração de energia para consumo local, seja no local de produção ou em seu entorno, podendo reduzir ou eliminar a necessidade de energia da rede pública ou até mesmo injetar o excedente em determinados períodos do dia, sendo assim, diferentemente dos sistemas isolados esse sistema é usado somente onde já existe disponibilidade de energia firme (VILLALVA G M E GAZOLI, 2012).

Sua topologia apesar de possuir uma estrutura mais simplificada, uma vez que não necessita de bancos de baterias, exige um controle mais sofisticado. Toda a energia gerada nos módulos é enviada para o inversor que a disponibiliza para as cargas. Caso a energia não seja utilizada naquele momento ela vai para o medidor que a injeta na rede.

O inversor desse tipo de instalação deve garantir alguns padrões de desempenho: tensão CA de saída com amplitude, frequência e conteúdo harmônico adequado às cargas a serem alimentadas, além ser sincronizada com a tensão da rede. esse tipo de inversor deve possuir as características necessárias para atender às exigências das concessionárias de distribuição local em termos de segurança e qualidade de energia a ser injetada na rede, como por exemplo, um sistema de anti-ilhamento que deve desligar o inversor durante faltas da rede firme de energia (URBANETZ, 2010).

Os métodos de controle aplicados nos inversores são diversos, porém o mais aplicado é o buscador do ponto de máxima potência (MPPT). Como as condições de funcionamento dos módulos, temperatura e irradiância, mudarem aleatoriamente durante o funcionamento do inversor nesse método o sistema tenta manter o sistema sempre em seu ponto de maior produtividade. Como mostra a figura 28 (VILLALVA G M E GAZOLI, 2012) .

Figura 28: Sistema solar fotovoltaico conectado à rede.



Fonte: (MACHADO; MIRANDA, 2014), adaptado.

Um grande passo para a popularização desse tipo de sistema foi a normatização por parte da ANEEL que, em 2012, com a Resolução Normativa N°482 os consumidores puderam injetar seu excedente de energia na rede elétrica. Essa energia entra como crédito de energia a ser abatido em seu consumo final, sendo cobrado em cima dessa transação o Imposto de

Circulação de Mercadorias e Serviços (ICMS), ficando a cargo da unidade da federação (UF) onde esse sistema esteja implantado cobrar esse imposto ou não (VILLALVA G M E GAZOLI, 2012).

No mesmo ano é publicada a Resolução Normativa N°517 que, dentre outras coisas determina a troca do medidor mecânico por um medidor de energia bidirecional, que registra tanto o montante consumido quanto o injetado na rede (VILLALVA G M E GAZOLI, 2012).

4.3.3 Potencial de geração no Brasil e no estado do Paraná

O Brasil é um país de dimensões continentais localizado e em sua maioria entre o trópico de capricórnio e a linha do equador, sendo assim o país a princípio é um candidato ideal para a instalação de sistemas fotovoltaicos, porém como já foi exposto os sistemas fotovoltaicos são muito sensíveis a variações locais de irradiação, do tipo gerado pelas particularidades de cada microclima se fazendo necessário o mapeamento desse recurso para seu correto aproveitamento (TIEPOLO, 2015).

Na década de 70 em decorrência da crise do petróleo, houve grande incentivo na pesquisa de fontes alternativas de energia. Uma das iniciativas foi à criação do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) com a instalação de 20 estações da Rede Solarimétrica Nacional as quais entraram em operação em 1977, sendo duas delas no estado do Paraná: uma em Curitiba (Latitude: 25,43° Sul; Longitude: 49,26° Oeste), e outra em Foz do Iguaçu (Latitude: 25,55° Sul; Longitude: 54,56 ° Oeste) (TIEPOLO, 2015).

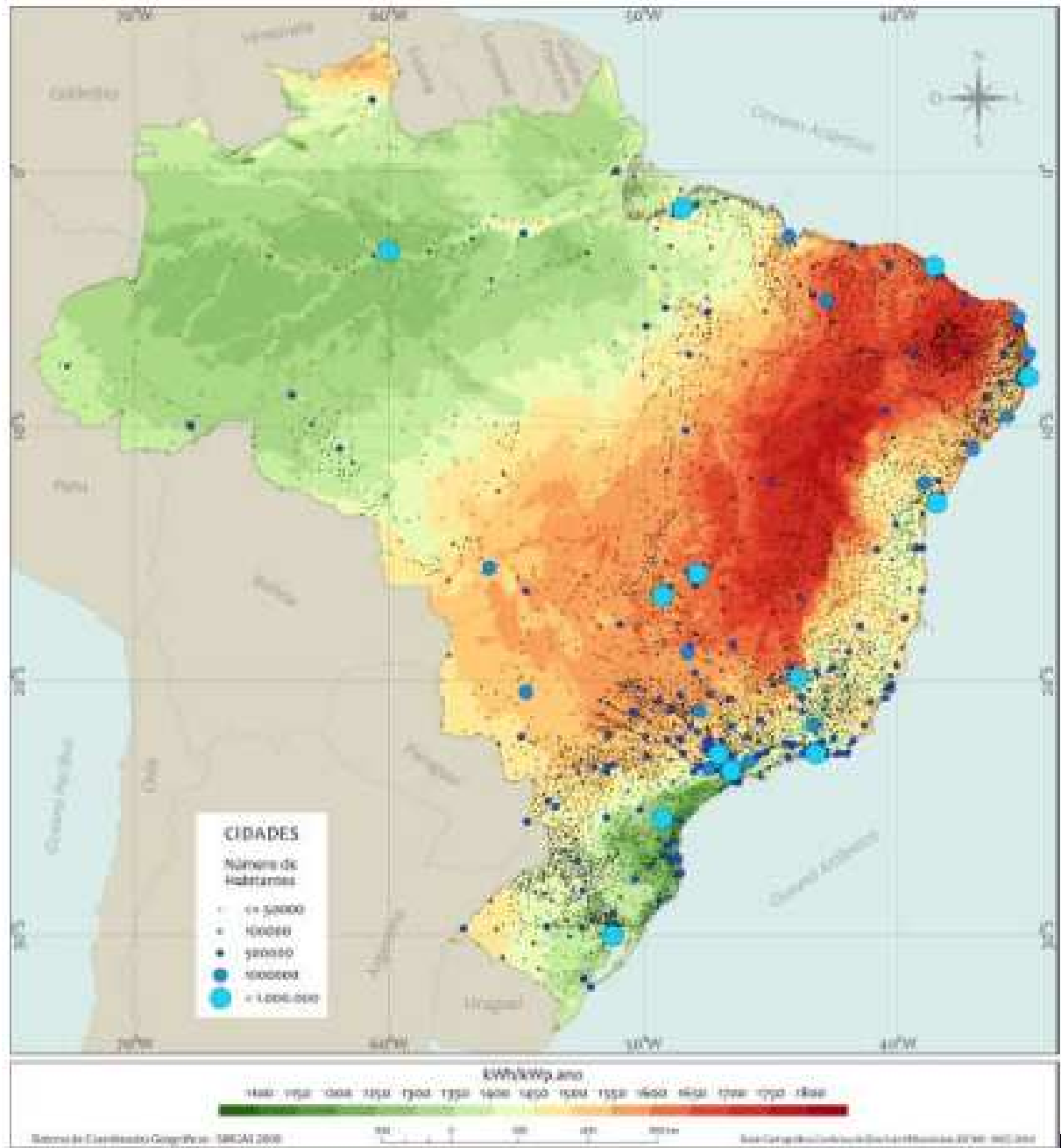
Em 2006 ocorreu a publicação da primeira edição do Atlas Brasileiro de Energia Solar, usando dados entre 1995 e 2005. A segunda edição do Atlas foi lançado em 2017 com dados entre 1999 e 2015. Esses trabalhos geraram, dentre muitos outros resultados um mapa nacional relacionando os pontos com maior população e a produção em kWh/kWp por ano de uma instalação com índice de performance de 80% ou seja, considerando perdas na instalação, módulos, inversores e advindas de outras fontes de 20%. Esse mapa está representado na Figura 29 (PEREIRA et al., 2017).

Um ponto válido de ressaltar é que na primeira edição a *performance ratio* dos sistemas era estabelecida em 75% pode-se perceber que o avanço das tecnologias aumentou esse índice para 80% (PEREIRA et al., 2017).

Como mostrado o mapa da Figura 29 o Brasil tem uma grande variação em termos de irradiação. Esses valores são altamente vulneráveis aos microclimas de cada região onde: ciclo de chuvas, nebulosidade e temperatura são alguns exemplos de fatores que podem afetar

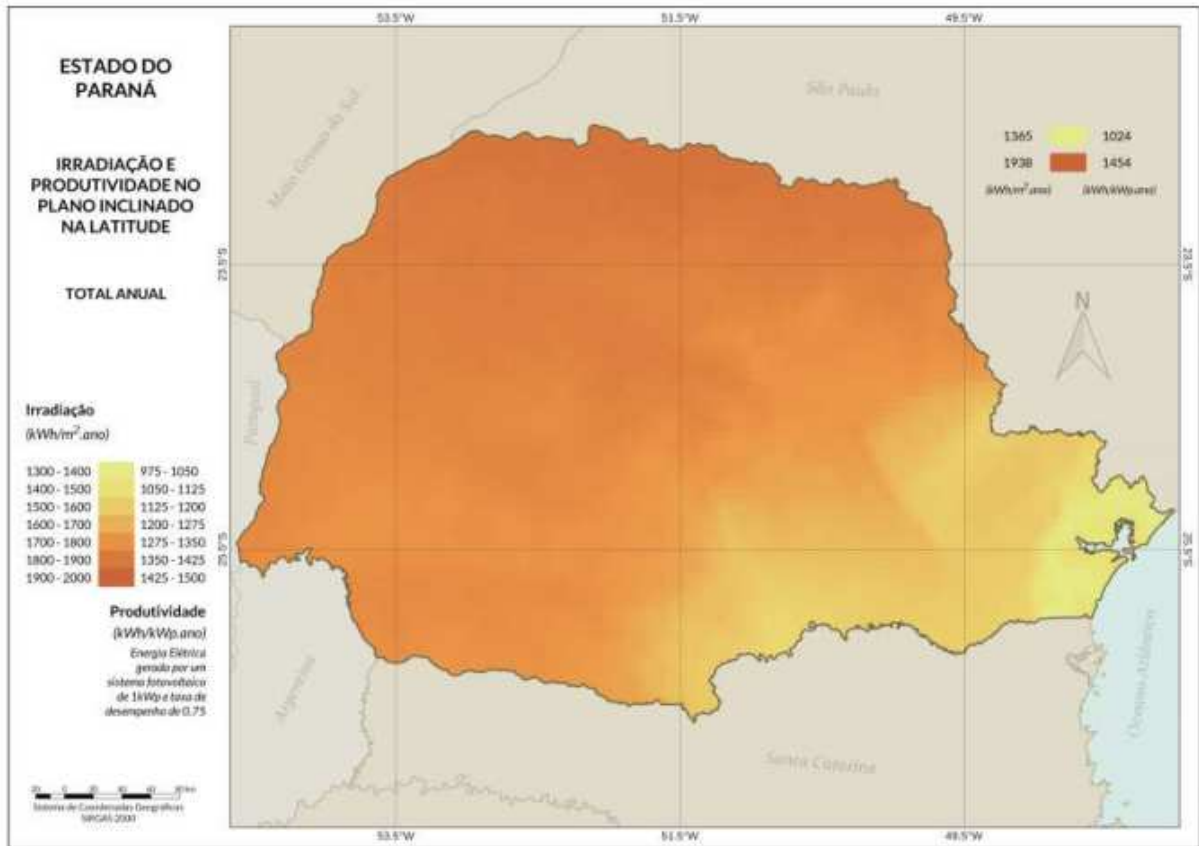
a performance do trabalho (VILLALVA G M E GAZOLI, 2012).

Figura 29: Potencial de geração solar fotovoltaica.



Nesse intuito foi lançado em 2017 o Atlas de Energia Solar do Estado do Paraná. Usando de uma base de dados similar ao Atlas Brasileiro de Energia Solar esse atlas diferencia a produção em cada mesorregião e também apresenta um mapa de produtividade tal qual o Atlas Brasileiro de Energia Solar, porém, ainda tomado como base uma performance ratio de 75% como demonstrado na Figura 30 (TIEPOLO et al., 2018).

Figura 30: Irradiação e produtividade no plano inclinado na latitude



Fonte: (TIEPOLO et al., 2018).

Comparando as médias obtidas no Estado do Paraná com as obtidas nos principais países europeus, pôde-se verificar que a média obtida no estado é 43,00% superior à da Alemanha; 2,22% superior à da Itália; 55,11% superior à do Reino Unido; 18,25% superior à da França e 8,14% inferior à da Espanha(TIEPOLO et al., 2018).

É importante ressaltar que até alguns anos atrás a Alemanha era a líder mundial em implantação de sistemas fotovoltaicos, hoje essa posição pertence à China, esse fato demonstra o potencial de implementação em sistemas fotovoltaicos no Paraná, bem como sua viabilidade (TIEPOLO et al., 2018).

Existem várias tecnologias aplicáveis ao uso em sistemas fotovoltaicos. Nesse trabalho serão usados módulos de p-Si uma vez que essa categoria de módulos é a que apresenta melhor custo benefício - 1,82 R\$ /Wp do módulo de p-Si contra 1,91 R\$ /Wp no módulo m-Si (jun 2019) (ALDOSOLAR, 2019).

Uma vez decidido o tipo de módulo a ser usado, foi escolhido a forma de armazenamento de energia. Foi optado pelo uso da topologia SFCR, injetando o excedente de energia na rede em forma de créditos. Esse sistema além de mais eficiente, 20% da energia

injetada em uma bateria é perdida, é menos oneroso pois não necessita de trocas constantes e manutenções advindas do uso de bancos de baterias.

Assim sendo já tem-se definidos todos os elementos essenciais do nosso sistema: um VE alimentado por baterias chumbo-ácido e recarregado pela rede, alimentado por SFCR composto por módulos de silício policristalino 335 Wp.

5 METODOS DE ENSAIO E PROJETO

5.1 ENSAIOS NO VEÍCULO ELÉTRICO POMPÉO

Este trabalho tem por objetivo estipular os requisitos para o fornecimento de energia elétrica para o recarregamento do VE Pompéo. Desta forma, primeiramente foram feitos ensaios visando compor o modelo de rodagem para o referido veículo. Os ensaios foram feitos no Sede Neville do Campus Curitiba da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, mostrado na Figura 31. Isso foi feito com o intuito de realizar os testes em ambiente controlado, porém com condições climáticas similares às de rodagem. Por fim, foram levantados os valores de demanda e consumo desse VE.

Figura 31: Local de Teste do Pompéo.



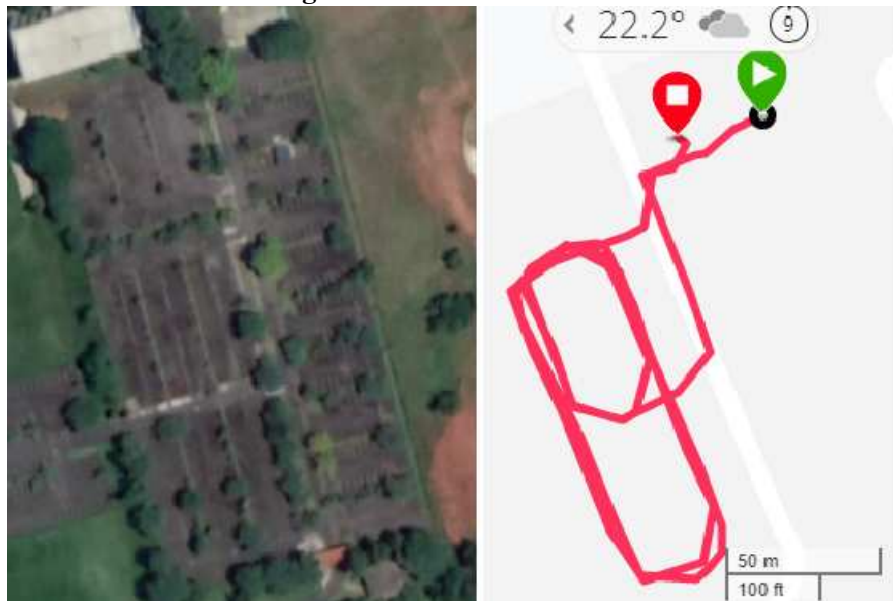
Fonte: Autoria própria

5.1.1 Ensaio de consumo

Esse ensaio visou determinar a energia necessária para rodar 1 km com o Pompéo. Para tanto foi aplicado a seguinte metodologia: rodou-se com o protótipo por 1 km em um determinado nível de bateria. Após isso o VE é novamente conectado à rede elétrica através do carregador e um medidor de energia e, então, é aferido o tempo e a energia necessária para que o Pompéo volte ao estado de carga anterior ao ensaio.

Como a velocidade desenvolvida por esse veículo é baixa, cerca de 4,6 km/h, foram usados sinais de *global positioning system* (GPS) e aplicativos de rotas para marcar a distância percorrida, como mostra na Figura 32. Nessa figura, o ícone verde mostra o início do percurso e o ícone vermelho o final do percurso. O trajeto se mostra como o percurso cor-de-rosa, e o ícone preto simboliza a posição do VE em determinado momento.

Figura 32: Percurso de teste



Fonte: Autoria própria

5.2 PROJETO DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO PARA ATENDER O POMPÉO

Nessa seção serão apresentados os requisitos e dimensionamento para um sistema fotovoltaico conectado a rede para suprir as necessidades de consumo do Pompéo levantadas seguindo os métodos apresentados na seção 5.1 e apresentados na seção 6.1. Também são apresentados os métodos de análise de viabilidade desse sistema e seus principais impactos econômicos e ambientais.

A primeira etapa é a estimativa do potencial de geração fotovoltaica existente na região de Curitiba. Isto é feito com a intenção de se detalhar a irradiação local e, em consequência disso, dimensionar o sistema fotovoltaico necessário para suprir a demanda gerada pelo recarregamento do protótipo.

Após a estimativa de H_{tot} e usando o *software* PV*Sol, foi modelado um sistema a partir de imagens e modelos em três dimensões, criado pelo *Google Earth*. O sistema foi modelado partindo de uma estrutura de *carport* como mostrado na Figura 33.

Figura 33: Simulação de sistema no PV*Sol



Fonte: Autoria própria.

Por fim foram feitos estudos de viabilidade, para determinar se tal sistema é exequível dos pontos de vista técnico e econômico, em contraponto a outros tipos de consumo como, por exemplo, usar a energia da rede sem o paralelismo com o SFCR.

5.2.1 Dimensionamento

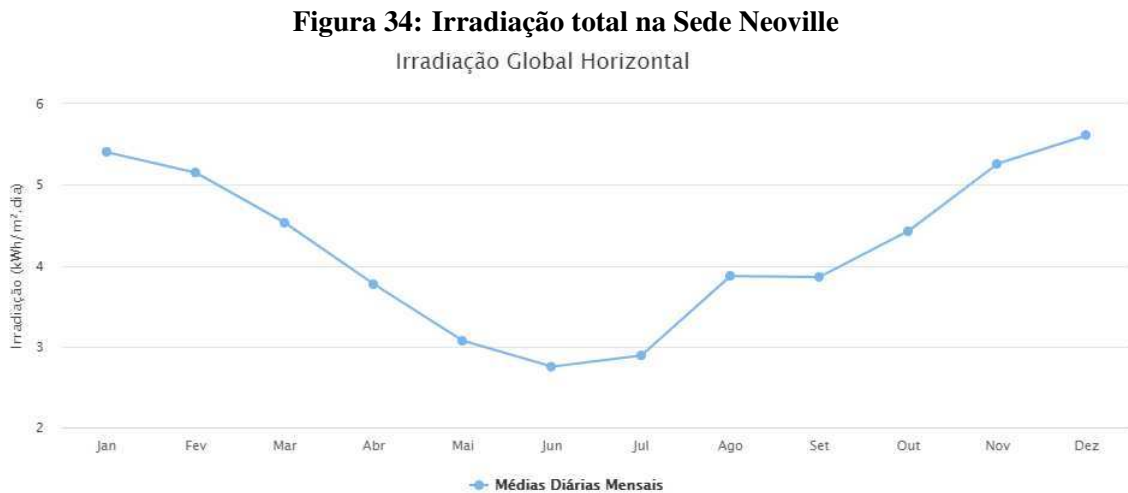
Os sistemas FV conectados a rede são projetados visando maximizar a energia gerada ao longo do ano. Sendo assim, os sistemas desse tipo devem priorizar o uso de inclinação igual a latitude do local. Na prática, o que ocorre em muitos casos é a adequação desses valores, seja para acompanhar a inclinação da superfície onde serão alocados, seja para mitigar os efeitos de vela que resultam da força do vento aplicada da superfície traseira dos módulos. Valores comerciais de estruturas ficam entre 5° e 30°.

Com o consumo diário calculado na seção 5.1 e apresentados na seção 6.1, foi possível

indicar o consumo anual do Pompéo. Partindo desse consumo, indicou-se como possível local de instalação o estacionamento da sede Neville do Campus Curitiba da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Para obtenção dos dados de geração serão usados os dados da base de dados do PV*Sol.

5.2.2 Estudo de Caso: Estacionamento Sede Neville

Será considerado como local de instalação um sistema com elevação sobre estrutura no estacionamento da Sede Neville. Pela versão *web* do Atlas de Energia Solar do Estado do Paraná pode-se ver a distribuição do rendimento e a irradiação anual no plano horizontal como mostrado na figura 34.



Fonte: (TIEPOLO et al., 2018)

O gráfico apresentado mostra os índices de H_{tot} para um plano horizontal. Para obter-se os valores nos planos e com os azimutes desejados deve-se usar programas que possam simular esses valores através de métodos numéricos, aqui será usado o modelo exposto por (PEREZ et al., 2002). Nesse trabalho será usado o *software* PV*Sol, desenvolvido pela empresa *Valentin Software GmbH* para esse fim. Usando esse programa, pode-se obter o valor de produtividade, aqui nomeada pela sua tradução do inglês *Yield*, para as condições de 15° de inclinação - valor típico para estruturas de fixação - e -20° de azimute - direção de orientação das vagas do estacionamento. Foram usados 5% de perdas anuais por se tratar de um sistema situado em local com pouco fluxo de carros e afastado do centro da cidade, perdas por *miss match* foram deixadas em 1,5% e o modelo e análise foi usado do modelo exposto por Perez et al. (2002). A Figura 39. Os Apêndices A e B, mostram atela de entradas e as premissas usadas para simulação.

Com o valor obtido e a energia de ciclo diário consumida pelo Pompéo obtida pela metodologia aplicada na seção 5.1.1 será calculada a potência necessária para alimentar esse, como mostrado nas equações 5:

$$P_{fv} = \frac{\text{Consumo}}{\text{Yield}} \quad (5)$$

Com esse resultado é possível dimensionar módulos e inversores e com isso tem-se os principais componentes a serem usados no sistema, o próximo passo é levantar o custo de um projeto envolvendo esses valores para que se possa calcular sua viabilidade.

5.3 VIABILIDADE

A viabilidade de um projeto pode ser dividida em duas grandes áreas: a viabilidade técnica e a viabilidade econômica.

Para que o estudo aqui proposto possa ser executado, as técnicas e tecnologias a serem usadas devem possuir um grau de amadurecimento que permita sua aplicação e haja previsibilidade em seu comportamento a longo prazo. Nesse sentido, as tecnologias tanto da geração de energia elétrica por módulos fotovoltaicos quanto da inversão da tensão CC/CA por meio de inversores são tecnologias que apresentam um grande número de estudos acadêmicos comprovando sua eficácia, normas e exigências legais a serem cumpridas e, por fim, garantias e procedimentos indicados pelos fabricantes para serem usados. Esses fatores demonstram o amadurecimento e a aplicabilidade dessas tecnologias.

No segundo ponto de viabilidade, viabilidade financeira, onde foram analisados os custos envolvidos em contrapartida dos retornos obtidos, tanto financeiros quanto ambientais. Para tanto, nessa foram feitos levantamentos junto a integradores que atuem na área do local de instalação.

Além disso foram realizados estudos para delimitar o desempenho do estudo de caso nas condições de instalação, visando levantar os custos, tempo de retorno, e quantidade de CO_2 evitado. Como parâmetros de análise de cálculos foram considerados:

- Inflação anual média de 4% ao ano;
- Aumento de tarifa:
 - 7,70% nos próximos 5 anos;
 - 5% nos demais anos;

- Degradação dos módulos:
 - 3% no primeiro ano;
 - 0,78% nos demais anos;
- Taxa de manutenção de 1,5% do valor de investimento ao ano;
- Troca do inversor no ano 15 de projeção.

5.4 CONSIDERAÇÕES

Nesse capítulo foram descritos os métodos experimentais e os cálculos usados para dimensionar um sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica para suprir o consumo do Pompéo. Isso foi baseado nos dados obtidos através dos testes de rodagem.

Para determinação de um padrão de rodagem deve-se entender dois principais fatores: quilômetros rodados por dia e tempo parado, porém para esse estudo o tempo em *stand-by* uma vez que uma estratégia de economia de energia do banco de baterias seria desligar o motor elétrico do VE nesse tempo ocioso.

Como exposto por Borba (2012), a média anual de distância percorrida por um veículo leve em meio urbano, está entre 14.000 e 20.000 Km anuais, porém, este autor utilizou para o estudo de veículos elétricos um regime de 16.000 km ao ano. Entretanto, para efeito de cálculos, neste trabalho foram usados 45 km diários, que daria 16.425 Km anuais, como padrão de rodagem. A princípio para modelos urbanos em Curitiba pode-se considerar uma autonomia de 45 km e 3 horas de carro em *stand-by*.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesse capítulo serão apresentados os resultados dos testes no VE Pompéo e dimensionamento para um sistema fotovoltaico conectado a rede para suprir as necessidades de consumo desse protótipo levantadas no Capítulo 5, bem como a viabilidade desse sistema e seus principais impactos.

A primeira etapa será a apresentação dos resultados e cálculo do modelo de consumo do Pompéo. Seguindo essa etapa serão mostrados os SF's projetados para esse consumo e os valores envolvidos nesses sistemas. Por fim será feito um estudo de viabilidade mostrando: *payback*, valores evitados, e quantidade de CO_2 evitados.

6.1 TESTES NO POMPÉO

Foi realizado teste que visa determinar a energia gasta pelo protótipo e tempo para que esse percurso fosse concluído. Os resultados foram compilados na Tabela 5:

Tabela 5: Comparativo entre tecnologias de baterias.

| Teste de Eficiência | | | | |
|---------------------|-----------|---------------|--------------|---------|
| Nº | Distância | Duração (min) | Recarga | |
| | | | Energia (Wh) | Tempo |
| 1 | 1,03 | 22:26 | 719 | 1:57:00 |
| 2 | 0,99 | 13:37 | 689 | 2:18:00 |
| 3 | 0,98 | 13:41 | 670 | 2:23:00 |
| 4 | 0,99 | 13:30 | 672 | 2:26:00 |
| 5 | 1,00 | 13:48 | 576 | 1:59:00 |
| 6 | 1,01 | 13:17 | 550 | 1:59:00 |
| Média | 1,00 | 15:03 | 646 | 2:10:20 |

Fonte: Autoria Própria

Como resultado foi obtido o valor médio de 646 Wh/km, que serviu de base para os estudos de demanda e consumo.

6.2 DEMANDA E CONSUMO

Foi calculada a potência instantânea necessária para abastecer o Pompéo a partir dos testes. Essa potência pode ser obtida a partir da tensão máxima e da corrente máxima registrada, nos testes o máximo valor registrado foi de 4,67 A.

$$Demanda = V_{max} \times I_{max} \Rightarrow 220 \times 4,67 = 1.027,4W \quad (6)$$

A próxima etapa foi a determinar de um ciclo de rodagem, o ciclo de uso diário usado para o meio urbano é de 45 km e 3 horas em *standby*, porém é uma estratégia de economia de energia em VE's cortar a alimentação do motor uma vez que os sistemas periféricos tem um consumo irrisório comparado ao consumo do ME. Nesse cenário o consumo diário do Pompéo seria de 29,07 kWh diários.

6.2.1 Estudo de Caso: Estacionamento Sede Neville

Usando o PV*Sol pode-se obter o valor de *Yield* para as condições de 15° de inclinação - valor típico para estruturas de *carport*- e -20° de azimute -direção de orientação das vagas no estacionamento. Nessas condições o PV*Sol retorna o valor de 1.176,45 Wh/kWp.

Com esse valor e a energia de ciclo diário consumida pelo Pompéo na seção 6.2 pode-se calcular a potência necessária para alimentar um determinado consumo, como mostrado nas equações 5 e 7:

$$P_{fv} = \frac{Consumo}{Yield} = \frac{29070 \times 365}{1176,45} = 9,02kWp \quad (7)$$

Com o resultado da equação 7 pode-se definir os valores e modelos de módulos a serem usados. Para esses casos foi usado o modelo *Canadian Solar CS6U-335P MaxPower*, para gerar 9,02 kWp seriam necessários 26,92 módulos, sendo assim serão usados 27 módulos 335 Wp, totalizando 9,045 kWp.

O próximo passo foi dimensionar um inversor para alimentar o sistema, segundo Pinho e Galdino (2014) o dimensionamento de inversores admite, via de regra entre 20% e 25 % de sobredimensionamento da potência de módulos em relação a potência do inversor. Com esses dados foi escolhido o inversor *Fronius Primo 8.2-1*, as principais características do inversor e do arranjo de módulos foram levantadas e compiladas na tabela 6.

Tabela 6: Compatibilidade entre inversor e Sistema FV

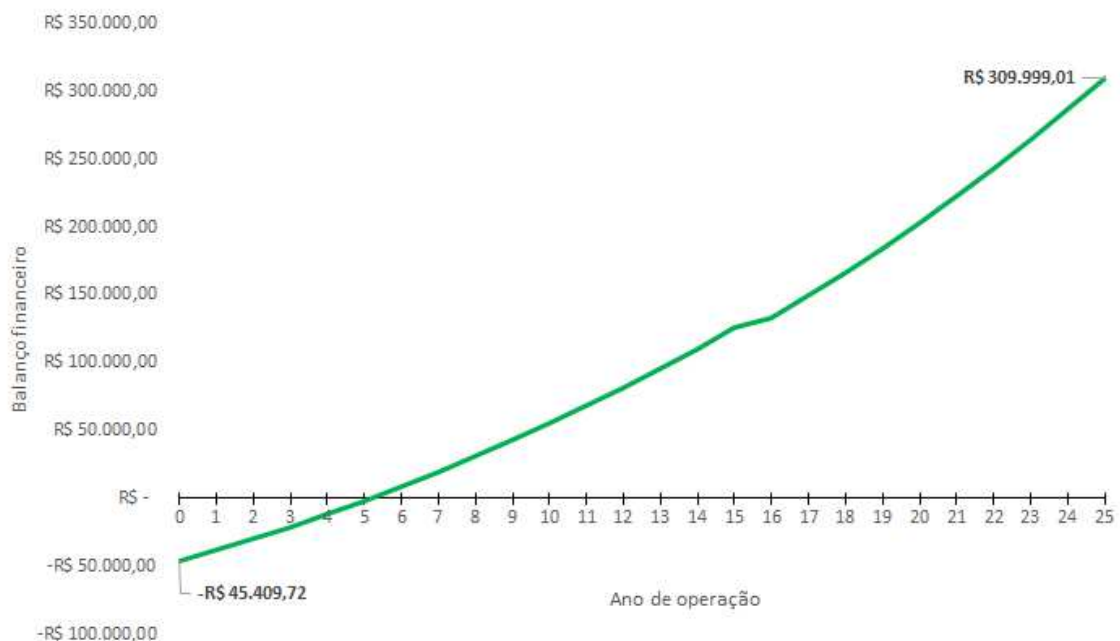
| Compatibilidade entre Inversor e PV | | |
|-------------------------------------|----------|------------|
| Característica | Inversor | Sistema FV |
| Potência Nominal [kW] | 8,2 | 9,045 |
| Máxima Tensão CC [V] | 1000 | 412,2 |
| Máxima Corrente de Entrada [A] | 18 | 17,92 |

Fonte: Autoria Própria

Aqui tem-se os principais componentes a serem usados no sistema, o próximo passo é fazer um projeto envolvendo valores para que se possa calcular sua viabilidade.

6.3 VIABILIDADE NO CASO DE ESTUDO

Segundo levantamento feito junto a empresas especializadas, o custo desse sistema incluindo materiais e mão de obra seria de: R\$ 45.409,70. Para esse montante e usando valores de R\$ 0,786816 (COPEL, 2019) e os parâmetros indicados na seção 5.3, foi montada a Tabela 9, no Apêndice C. Organizando as informações de forma mais visual, tem-se o gráfico mostrado na Figura 35 com o tempo de retorno do investimento em 61 meses e um capital economizado final de R\$ 309.999,01 .

Figura 35: Balanço financeiro

Fonte: Autoria própria

A tabela 7 mostra outras métricas importantes do sistema.

Tabela 7: Métricas associadas ao Sistema Fotovoltaico

| Métricas associadas ao SV | |
|---|--------------------|
| Redução anual na emissão de Dióxido de Carbono na natureza | 2839 kg |
| Geração anual de energia elétrica (inicial / média durante 25 anos) | 10640 / 94459 kWh |
| Média de consumo mensal | 872,1 kWh |
| Tarifa referência apontada pela Copel | 0,786816 R\$ / kWh |
| Economia no primeiro ano | R\$ 8246 |

Fonte: Autoria própria

6.4 DISCUSSÃO

Como foi visto nesse capítulo, os valores de energia para alimentação e consumo associados ao Pompéo são mais altos que os valores dos modelos comerciais, como mostrado na Tabela 8. Por ser um protótipo e ter sido lançado há alguns anos, a tecnologia aplicada a ele é bem mais simples. Por exemplo, as baterias que no Pompéo são de Pb-A enquanto os modelos comerciais usam baterias de Li-ion, além de um controle de carga mais robusto e otimizado. Por esses motivos, era esperado que esses índices fossem mais baixos que os de modelos comerciais disponíveis no mercado.

Tabela 8: Comparativo entre modelos de VE's

| Comparativo entre modelos de VE's | | | |
|-----------------------------------|--------|-------------|--------|
| Modelo | Pompéo | Nissan Leaf | BMW i3 |
| Velocidade [km/h] | 5 | 144 | 150 |
| Energia de bateria [kWh] | 0,78 | 40 | 50 |
| Consumo por km rodado [Wh/km] | 646 | 102 | 131 |

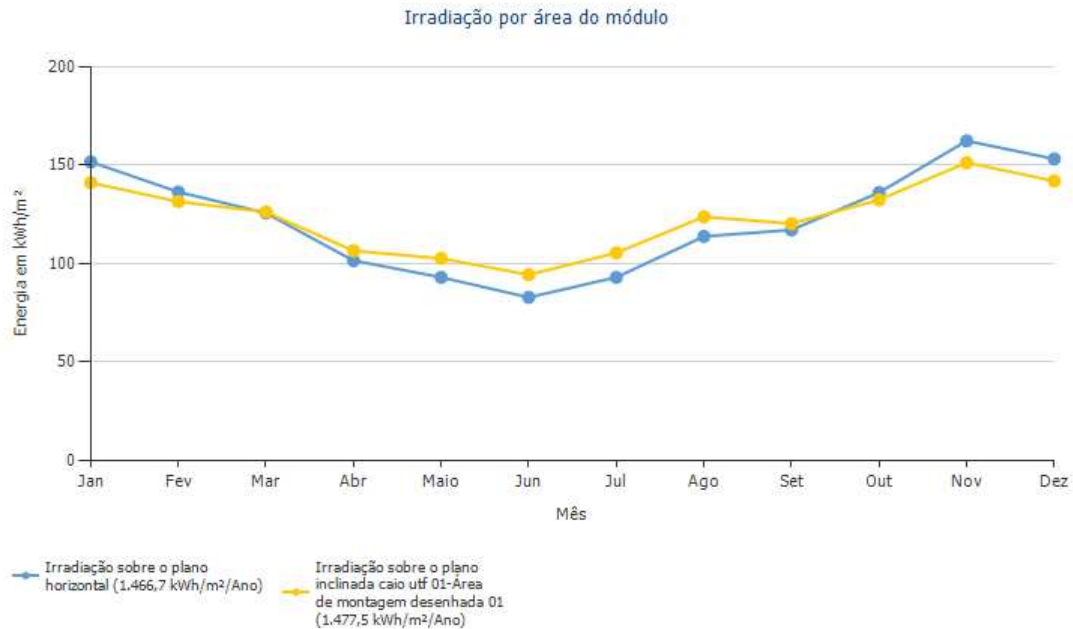
Fonte: (BMW, 2019) e (NISSAN, 2019)

Os valores associados à rodagem mostrados na Tabela 5 são muito dependentes do controle e aceleração impostos ao veículo, impactando direta e significativamente no tempo de recarga. O sistema também não possui um limitador de corrente muito eficiente e por vezes após um período de aceleração maior o sistema entrava em falha por ter sido drenada uma corrente muito alta do banco de baterias.

Em relação ao SFCR, a simulação mostra o perfil de H_{tot} na horizontal segue o mesmo perfil traçado usando a versão *web* do Atlas Paranaense de Energia Solar do Estado do Paraná,

como mostrado na Figura 36. Esse fato demonstra a acuidade do método usado pelo PV*Sol, porém há algumas divergências mínimas que se dão pelas bases de dados e períodos analisados serem diferentes.

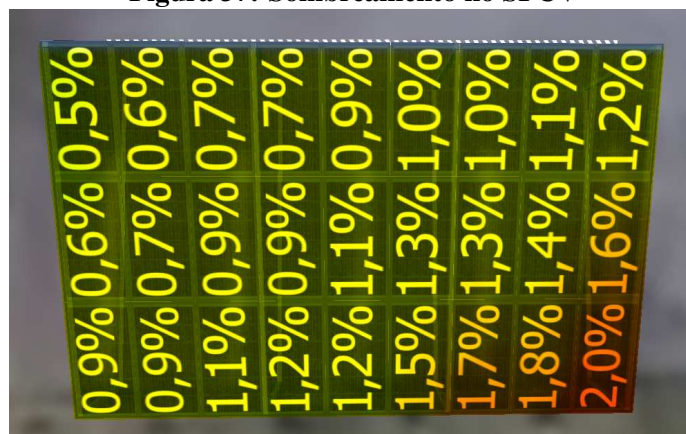
Figura 36: H_{tot} no ponto de instalação



Fonte: Autoria própria

Pode-se perceber também que há poucas perdas por sombreamento, como mostrado na Figura 37. Isso se dá por causa do local escolhido ter poucas árvores e prédios altos no seu entorno, sendo assim os resultados são os melhores possíveis dentro de um meio urbano. Esse fato está alinhado ao objetivo final de que alimentação de VE's faz com que estacionamentos sejam ótimos candidatos para receber esse tipo de sistemas.

Figura 37: Sombreamento no SFCV



Fonte: Autoria própria

Outros pontos válidos de serem destacados são: o tempo de retorno do investimento e o montante ao final do período de análise, que são fortemente impactados pelo preço do *carport*, que representa um terço do preço final de venda do sistema em comparação com sistemas instalados em telhado, onde esse equipamento representa em torno de 12%, e pelo aumento da tarifa da conta que nos últimos anos vêm crescendo em valores acima da inflação.

Por fim, os valores evitados de CO_2 , que ligam os 2 sistemas, inverte a relação de aumento proposta do Capítulo 1. Sendo assim há uma situação de diminuição na emissão de gases poluentes em comparação ao uso de MCI como propulsão para veículos.

7 CONCLUSÃO

Os veículos elétricos tem se tornado cada vez mais parte da dinâmica das ruas no Brasil e nos próximos anos ganharão cada vez mais destaque e competitividade. Este modal se apoia em sua maior eficiência na rodagem, menor ruído e por ser uma tecnologia mais amigável ao meio ambiente. Por outro lado, esses veículos apresentam também uma limitada autonomia e um custo ambiental de produção de energia bem maior, podendo chegar a produzir 80 % mais carbono que um veículo com motor de combustão interna. Sendo assim, deve-se considerar toda a cadeia de produção de energia, da geração até o consumo pelo VE nas ruas.

Dessa forma, postos de carregamento com cobertura solar, além de produzir energia para os arredores quando não estão carregando um VE, geram créditos que podem ser usados quando as condições não são favoráveis para geração de energia elétrica, diminuindo o impacto de carbono desse modal. Tendo isso em vista, foram feitos ensaios para delimitar o consumo do VE Pompeo e a partir disso foi dimensionado um sistema de carregamento para esse VE, afim de delimitar se esse sistema era viável técnica e economicamente.

Os resultados obtidos se alinham com a proposta do trabalho, porém, por se tratar de um protótipo, algumas premissas não puderam ser garantidas, uma vez que o Pompéo não possui autonomia de bateria suficiente para cumprir o modelo de rodagem estipulado. Em função da sua bateria ser de Pb-A e de sua eletrônica, a autonomia do modelo é estimada em 1,18 Km, fazendo com que o ensaio de tempo de carregamento tenha ficado próximo a um teste de autonomia. Considerando esses dados e o tempo de carregamento em um regime de 8 horas de trabalho, o Pompéo é capaz de rodar 3,31 km por dia. Dessa forma, valores de autonomia do Pompéo, como esperado, se mostraram menores que os valores de mercado, enquanto os valores de consumo se mostraram valores acima dos valores de mercado, sendo acima de modelos como o *Nissan Leaf* e BMW i3, chegando a valores de consumo aproximadamente seis vezes maiores.

Quanto ao sistema para alimentação desse protótipo, os valores de geração em função da disponibilidade do Pompéo, que seria a energia necessária para suprir a autonomia no regime de 45 km diários, se alocam bem na estrutura de um *carport*. Desta forma, o sistema se torna

viável para esse modelo e apresenta custos de implementação abaixo dos R\$ 50.000,00 em valores de 2019.

Os cálculos e análises demonstraram que alguns fatores devem ser considerados na implementação do SFCR, como possíveis saboreamentos, acúmulo de sujidades, e em relação ao custo vale destacar a importância da estrutura de fixação desses módulos que contribuem significativamente para seu custo.

Após os experimentos, pode-se inferir que para uma rodagem mais eficiente seria necessária a troca das baterias por uma outra tecnologia como a de Li-ion, além da implementação de um limite de corrente que delimitasse a aceleração e, por consequência, a corrente drenada das baterias evitando descarregamento precoce e deterioração acelerada dos armazenadores de energia.

7.1 PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Como fica evidente a importância que o modal elétrico virá a ter nos próximos anos, se torna de extrema importância o teste de carros elétricos presentes no mercado nacional, bem como de *start-ups* que vêm surgindo pelo país. Uma proposta é o estudo de VE's nacionais frente à modelos *smart* que são vendidos no mercado nacional. Como outros custos além do consumo estão associados à carros, uma análise global de custos incluindo manutenção, disponibilidade para troca de peças e possível revenda se mostraria uma base decisória importante e cada vez mais comum.

Em relação ao sistema de carregamento, pode ser feita uma análise técnico-comercial de um sistema que use geração remota para compensação do uso nos pontos de carregamento. Uma vez que esses postos, quando em grandes cidades, devem não apresentar resultados satisfatórios de geração fotovoltaica, além de diversificar e flexibilizar os locais de instalação dos postos de carregamento nível 3.

REFERÊNCIAS

- ABNT, N. Iec 27001: 2006. **Tecnologia da informação-Técnicas de segurança-Sistemas de gestão de segurança da informação-Requisitos**, 2006.
- ABVE. **IPVA – para veículos elétricos**. 2017. ABVE. Disponível em: <<http://www.abve.org.br/ipva-para-veiculos-eletricos/>>. Acesso em: 29 nov. 2019.
- ALDOSOLAR. **ALDO solar venda de materiais para sistemas fotovoltaicos**. 2019. Aldo solar. Disponível em: <<http://www.aldo.com.br/>>. Acesso em: 01 jun. 2018.
- ARAUJO, A. L. d.; EICHENBERGER, A. C. **Inserção de veículos elétricos: análise dos impactos no sistema elétrico de potência na subestação Central/Batel em Curitiba**. 2015. Dissertação (B.S. thesis) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2015.
- BARAN, R.; LEGEY, L. F. L. **Veículos elétricos: história e perspectivas no brasil**. **BNDES Setorial, Rio de Janeiro, n. 33, p. 207-224, mar. 2011.**, Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social, 2011.
- BARROS, L. L. **Requisitos para fornecimento de energia elétrica para recarga de veículo elétrico em Curitiba através de sistemas fotovoltaicos e concessionária de energia**. 2013. Dissertação (B.S. thesis) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2013.
- BELLIS, M. A **History of Electric Vehicles**. 2017. ThoughtCo. Disponível em: <<https://thoughtco.com/history-of-electric-vehicles-1991603>>. Acesso em: 10 mai. 2018.
- BMW. **BMW i3, Inspirado pelo futuro, construído para o presente**. 2019. BMW. Disponível em: <<https://www.bmw.com.br, urlaccessdate=16 nov. 2019>>.
- BORBA, B. Modelagem integrada da introdução de veículos leves conectáveis à rede elétrica no sistema energético brasileiro. **Universidade Federal do Rio de Janeiro**, p. 23, 2012.
- CANADIAN. **Candian MAXIPOWER CSÜ-335**. <https://drive.google.com/file/d/1O9uV-k0SuhSFRjGKcbGv4FF3jYvFsFdi/view>, 2019. Acesso em: 16 nov. 2019.
- CARNEIRO, R.; MOLINA, J.; ANTONIASSI, B.; MAGDALENA, A.; PINTO, E. Aspectos essenciais das baterias chumbo-ácido e princípios físico-químicos e termodinâmicos do seu funcionamento. **Revista Virtual de Química**, v. 9, p. 889–911, 2017.
- CASTRO, B. H. R. d.; BARROS, D. C.; VEIGA, S. G. d. Baterias automotivas: panorama da indústria no brasil, as novas tecnologias e como os veículos elétricos podem transformar o mercado global. **BNDES Setorial, n. 37, mar. 2013, p. 443-496**, Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social, 2013.
- CAVALCANTE, A. W.; CARVALHO, P. C.; LIMA, L. C. de. Célula combustível e bateria integrados a sistema fotovoltaico. **Revista Tecnologia**, v. 26, n. 2, 2005.

CHAN, C. et al. The state of the art of electric and hybrid vehicles. **Proceedings of the IEEE**, v. 90, n. 2, p. 247–275, 2002.

CHAN, C. C. The rise & fall of electric vehicles in 1828–1930: Lessons learned [scanning our past]. **Proceedings of the IEEE**, IEEE, v. 101, n. 1, p. 206–212, 2013.

CHAU, K.; WONG, Y. Overview of power management in hybrid electric vehicles. **Energy conversion and management**, Elsevier, v. 43, n. 15, p. 1953–1968, 2002.

COPEL. “**Tarifa Convencional - subgrupo B1**”. 2019. COPEL. Disponível em: <<https://forocochelectricos.com/2017/07/tesla-model-3-ficha-tecnica.html>>. Acesso em: 10 jun. 2019.

COPETTI, J. B.; MACAGNAN, M. H. Baterias em sistemas solares fotovoltaicos. In: SN. **I CBENS-I Congresso Brasileiro de Energia Solar**. 2007. p. 29.

DELGADO, F.; COSTA, J. E. G.; FEBRARO, J.; SILVA, T. B. d. Carros elétricos. FGV Energia, 2017.

DUNN, B.; KAMATH, H.; TARASCON, J.-M. Electrical energy storage for the grid: a battery of choices. **Science**, American Association for the Advancement of Science, v. 334, n. 6058, p. 928–935, 2011.

FIRSTSOLAR. **First Solar Series 4™**. <http://www.firstsolar.com>, 2018. Acesso em: 16 nov. 2019.

FONTAINHAS, J. J. C. **Avaliação da viabilidade econômica da aquisição de um veículo elétrico em Portugal**. 2013. Tese (Doutorado) — Universidade do Minho, 2013.

FULTON, L.; WARD, J.; TAYLOR, P.; KERR, T. **Technology roadmap: Electric and plug-in hybrid electric vehicles**. OECD/IEA, 2009.

JIANG, J.; ZHANG, C. **Fundamentals and applications of lithium-ion batteries in electric drive vehicles**. John Wiley & Sons, 2015.

JONES, K. B.; JERVEY, B. B.; ROCHE, M.; BARNOWSKI, S. **The Electric Battery: Charging Forward to a Low-carbon Future**. ABC-CLIO, 2017.

KLEINA, N. “**A história da Tesla, a empresa que revolucionou o transporte**”. 2017. TECMUNDO. Disponível em: <<https://www.tecmundo.com.br/mobilidadeurbana-smart-cities/122589-historia-tesla-empresa-revolucionou-transportevideo.htm>>. Acesso em: 10 mai. 2018.

KURIOSITAS. **Electrobat Automobile, the world’s first electric car by the Baker Motor Vehicle Company developed in 1899**. 2010. KURIOSITAS. Disponível em: <<https://www.greenlaunches.com/transport/electrobat-automobile-the-worlds-first-electric-car-by-the-baker-motor-vehicle-company-developed-in-1899.php>>. Acesso em: 29 nov. 2019.

LINDEN, D. Handbook of batteries. In: **Fuel and Energy Abstracts**. 1995. v. 4, n. 36, p. 265.

MACHADO, C. T.; MIRANDA, F. S. Energia solar fotovoltaica: uma breve revisão. **Revista virtual de química**, v. 7, n. 1, p. 126–143, 2014.

MATULKA, R. Timeline: history of the electric car. Retrieved from United States Department of Energy Website: <http://energy.gov/articles/historyelectric-car>, 2014. Acesso em: 10 mai. 2018.

NASCIMENTO, C. A. D. Princípio de funcionamento da célula fotovoltaica. Diss. Universidade Federal de Lavras, 2004.

NBR, A. 10899 energia solar fotovoltaica-terminologia. ABNT-Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, 20013.

NBR, A. 11704 sistemas fotovoltaicos—classificação. ABNT-Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, 2008.

NISSAN. NOVO NISSAN LEAF. 2019. Nissan. Disponível em: <<https://www.nissan.com.br/veiculos/modelos/leaf.html>>. Acesso em: 16 nov. 2019.

NOYA, C. “Tesla Model 3: Ficha técnica. Medidas, autonomia, preço”. 2018. Foro Coches Electricos. Disponível em: <<https://forococheselectricos.com/2017/07/tesla-model-3-ficha-tecnica.html>>. Acesso em: 10 mai. 2018.

PAVLOV, D. **Lead-acid batteries: science and technology**. Elsevier, 2011.

PEREIRA, E.; MARTINS, F.; GONÇALVES, A.; COSTA, R.; LIMA, F.; RÜTHER, R.; ABREU, S.; TIEPOLO, G.; PEREIRA, S.; SOUZA, J. **Atlas Brasileiro de Energia Solar—2ª Edição, São José dos Campos**. 2017.

PEREIRA, S. C. M. **PROJETO DE MICROGERAÇÃO FOTOVOLTAICA CONECTADA À REDE DE DISTRIBUIÇÃO COM ANÁLISE ECONÔMICO-FINANCEIRA PARA A COMUNIDADE DO QUILOMBO DO CAMPINHO DA INDEPENDÊNCIA EM PARATY-RJ**. 2019. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2019.

PEREZ, R.; INEICHEN, P.; MOORE, K.; KMIETIK, M.; CHAIN, C.; GEORGE, R.; VIGNOLA, F. A new operational model for satellite-derived irradiances: description and validation. **Solar Energy**, Elsevier, v. 73, n. 5, p. 307–317, 2002.

PESQUERO, N.; BUENO, P. R.; VARELA, J. A.; LONGO, E. Materiais cerâmicos de inserção aplicados a baterias de íons lítio. **Cerâmica**, Associação Brasileira de Cerâmica, p. 233–244, 2008.

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos. **Rio de Janeiro**, v. 1, p. 47–499, 2014.

REDDY, T. B. **Linden’s handbook of batteries**. Mcgraw-hill New York, 2011.

RÜTHER, R. **Edifícios solares fotovoltaicos: o potencial da geração solar fotovoltaica integrada a edificações urbanas e interligada à rede elétrica pública no Brasil**. Editora UFSC, 2004.

TESKE, S.; PREGGER, T.; PAGENKOPF, J.; ADEL, B. van den; DENIZ, Ö.; MEINSHAUSEN, M.; GIURCO, D. Discussion, conclusions and recommendations. In: **Achieving the Paris Climate Agreement Goals**. Springer, 2019. p. 471–487.

TIEPOLO, G. Estudo do potencial de geração de energia elétrica através de sistemas fotovoltaicos conectados à rede no estado do paraná. **Curitiba: SIBI/PUCPR**, 2015.

TIEPOLO, G. M.; PEREIRA, E. B.; JUNIOR, J. U.; PEREIRA, S. V.; GONÇALVES, A. R.; LIMA, F. J. L. de; COSTA, R. S.; ALVES, A. R. Atlas de energia solar do estado do paraná-resultados. In: **Anais do VII Congresso Brasileiro de Energia Solar, Gramado-RS**. 2018. p. 1–10.

TRINDADE, R. H. L. Estudo das características de baterias recarregáveis possíveis de serem utilizadas no projeto satélite universitário, itasat. **12o Encontro de Inicia o Científica e Pós-Gradua o do ITA-XII ENCITA**, 2006.

URBANETZ, J. Sistemas fotovoltaicos conectados a redes de distribui o urbanas: sua influência na qualidade da energia elétrica e análise dos parâmetros que possam afetar a conectividade. **Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis**, p. 189, 2010.

VILLALVA G M E GAZOLI, J. R. Conceitos e aplica es, sistemas isolados e conectados   rede. **Editora  rica**, v. 1, 2012.

WITZENBURG, G. At witz'end: Gm ev1—the real story part iii. **Green Car News**, 2008.

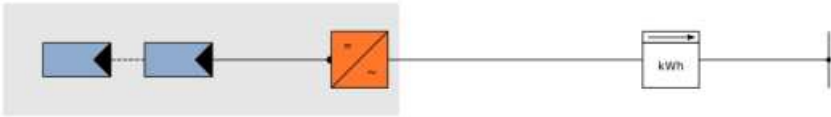
YILMAZ, M.; KREIN, P. T. Review of battery charger topologies, charging power levels, and infrastructure for plug-in electric and hybrid vehicles. **IEEE transactions on Power Electronics**, Ieee, v. 28, n. 5, p. 2151–2169, 2012.

APÊNDICE A – TELA INICIAL PV*SOL

Figura 38: Tela Inicial PV*Sol

Tipo de sistema, clima e rede

Tipo de sistema
 3D, Sistema fv conectado à rede



Tipo de modelagem
 Modelar sistema em 3D

Dados climáticos

País: Brasil Local: Curitiba

| | | | |
|--------------|-------------|---|-------------------------|
| Latitude | -25° 25' 1" | Soma anual da irradiação global | 1467 kWh/m ² |
| Longitude | -49° 16' 1" | Média anual da temperatura | 17,6 °C |
| Fuso horário | UTC-3 | | |
| Período | 1991 - 2010 | | |
| Resolução | Por minuto | Parâmetros da simulação | |

Rede c.a.

Inserir

| | |
|--------------------------|----------|
| Tensão (N-L1) | 230 V |
| Quantidade de | 3-fásico |
| cos φ | 1 |
| Limitação da potência de | Não |

Fonte: Autoria própria.

APÊNDICE B – PARÂMETROS DE ENTRADA PV*SOL

Figura 39: Parâmetros de entrada PV*Sol

- Opções do programa
 - Usuário
 - Avançado
 - Resetar as definições de fábrica
- Opções do projeto
 - Rede c.a.
 - Simulação
 - Limites de configuração
 - Configuração automática
 - Relatório
 - Resultados da simulação

Modelagem 3D: Calcular a diminuição do rendimento devido a sombras (requer 2 simulações)

Parâmetros para os dados climáticos

Perdas devido a desvio do espectro padrão %

Simular com valores de minutos sintetizados da irradiação

Modelo para radiação difusa

Modelo para radiação no nível inclinado

Resultados detalhados da simulação

Registrar valores de radiação difusa e direta

Gravar curvas características para módulos

Parâmetros para as áreas de módulos

Inserir as áreas de módulos separadamente

Perdas de potência devido a queda da tensão nos diodos de desvio %

Perdas de potência devido a Mismatch ou menor rendimento %

Usando micro-inversores e otimizadores de potência não são consideradas quaisquer perdas de Mismatching.

Reflexão do solo (albedo)

Albedo médio ao longo do ano %

Albedo em valores mensais

| Jan | Fev | Mar | Abr | Mai | Jun | Jul | Ago | Set | Out | Nov | Dez |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 20 % | 20 % | 20 % | 20 % | 20 % | 20 % | 20 % | 20 % | 20 % | 20 % | 20 % | 20 % |

Fonte: Autoria própria.

APÊNDICE C – FLUXO DE CAIXA NO ESTUDO DE CASO

Tabela 9: Fluxo de Caixa.

| Ano Índice | Energia Gerada [kWh] | Retorno [R\$] | Custos [R\$] | Fluxo [R\$] | Somatória [R\$] |
|------------|----------------------|---------------|--------------|-------------|-----------------|
| 0 | 10.481,38 | 8.246,75 | -45.409,72 | - 37.162,97 | -45.409,72 |
| 1 | 10.283,54 | 8.714,10 | -708,39 | 8.005,71 | -37.162,97 |
| 2 | 10.203,84 | 9.312,35 | -736,73 | 8.575,63 | -29.157,26 |
| 3 | 10.124,76 | 9.951,68 | -766,20 | 9.185,48 | -20.581,63 |
| 4 | 10.046,30 | 10.634,89 | -796,84 | 9.838,05 | -11.396,15 |
| 5 | 9.968,44 | 11.365,01 | -828,72 | 10.536,29 | -1.558,10 |
| 6 | 9.891,18 | 11.840,78 | -861,87 | 10.978,91 | 8.978,19 |
| 7 | 9.814,52 | 12.336,46 | -896,34 | 11.440,12 | 19.957,11 |
| 8 | 9.738,46 | 12.852,90 | -932,19 | 11.920,71 | 31.397,23 |
| 9 | 9.662,99 | 13.390,95 | -969,48 | 12.421,47 | 43.317,94 |
| 10 | 9.588,10 | 13.951,53 | -1.008,26 | 12.943,27 | 55.739,41 |
| 11 | 9.513,79 | 14.535,58 | -1.048,59 | 13.486,99 | 68.682,68 |
| 12 | 9.440,06 | 15.144,08 | -1.090,54 | 14.053,54 | 82.169,67 |
| 13 | 9.366,90 | 15.778,04 | -1.134,16 | 14.643,89 | 96.223,21 |
| 14 | 9.294,31 | 16.438,55 | -1.179,52 | 15.259,03 | 110.867,10 |
| 15 | 9.222,28 | 17.126,71 | -10.015,70 | 7.111,01 | 126.126,13 |
| 16 | 9.150,80 | 17.843,68 | -1.275,77 | 16.567,91 | 133.237,13 |
| 17 | 9.079,88 | 18.590,66 | -1.326,80 | 17.263,86 | 149.805,04 |
| 18 | 9.009,52 | 19.368,91 | -1.379,88 | 17.989,04 | 167.068,89 |
| 19 | 8.939,69 | 20.179,74 | -1.435,07 | 18.744,67 | 185.057,93 |
| 20 | 8.869,91 | 21.023,33 | -1.492,47 | 19.530,86 | 203.802,60 |
| 21 | 8.800,67 | 21.902,18 | -1.552,17 | 20.350,00 | 223.333,46 |
| 22 | 8.731,96 | 22.817,75 | -1.614,26 | 21.203,49 | 243.683,46 |
| 23 | 8.663,79 | 23.771,59 | -1.678,83 | 22.092,76 | 264.886,95 |
| 24 | 8.596,15 | 24.765,28 | -1.745,98 | 23.019,30 | 286.979,71 |
| 25 | 8.466,70 | 25.611,98 | -1.815,82 | 23.796,16 | 309.999,01 |

Fonte: Autoria própria