



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E INFORMÁTICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

Wellinson Costa dos Santos

Aplicação de Baterias Chumbo-Ácido para Veículos Elétricos Híbridos

Campina Grande

Abril 2015

Wellinson Costa dos Santos

Aplicação de Baterias Chumbo-Ácido para Veículos Elétricos Híbridos

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Unidade
Acadêmica de Engenharia Elétrica da Universidade
Federal de Campina Grande como parte dos requisitos
necessários para a obtenção do grau de Bacharel em
Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Engenharia de Energia

Orientadora:

Professora Núbia Silva Dantas Brito, D. Sc.

Campina Grande

Abril 2015

Wellinson Costa dos Santos

Aplicação de Baterias Chumbo-Ácido para Veículos Elétricos Híbridos

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Unidade
Acadêmica de Engenharia Elétrica da Universidade
Federal de Campina Grande como parte dos requisitos
necessários para a obtenção do grau de Bacharel em
Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Engenharia de Energia

Aprovado em: / /

Professor Avaliador

Universidade Federal de Campina Grande

Avaliador

Professora Núbia Silva Dantas Brito, D. Sc.

Universidade Federal de Campina Grande

Orientadora, UFCG

Agradecimentos

Agradeço a meus pais, José Wellington e Silvandira, por todo amor, carinho e ensinamentos durante toda minha vida.

Agradeço também a toda minha família, que mesmo com a distância, sempre acompanhou de perto meu crescimento pessoal e profissional.

Meus agradecimentos aos amigos feitos durante a graduação, companheiros de trabalhos e irmãos na amizade que fizeram parte da minha formação, e que espero que possam continuar presentes em minha vida.

Agradeço a professora Núbia Silva Dantas Brito, minha orientadora, pela orientação, paciência e empenho dedicado à elaboração deste trabalho.

E finalmente, gostaria de agradecer ao corpo docente, à direção e à administração por seu trabalho na formação de todos os alunos desta instituição.

Resumo

O esforço para reduzir o consumo de combustível no setor de transportes atingiu níveis sem precedentes nos últimos cinco anos. Os veículos híbridos e elétricos são procurados como tecnologias críticas que podem reduzir o consumo de combustível e emissão de CO₂, os níveis elevados desses gases na atmosfera são considerados um dos principais contribuintes para o aquecimento global. Diversas políticas governamentais de todo o mundo estão oferecendo incentivos financeiros para a eletrificação de veículos, estabelecimento de padrões de menor consumo de combustível da frota da média e ainda a obrigatoriedade da introdução de veículos eletrificados. Neste contexto, este Trabalho de Conclusão de Curso apresenta um estudo de aplicação de baterias de Chumbo-Ácido para Veículos Elétricos Híbridos.

Palavras-chaves: Baterias chumbo-ácido, veículos elétricos híbridos.

Abstract

The drive to reduce fuel consumption in the transportation sector has reached unprecedented levels in the last five years. Hybrid and electric vehicles are sought after as critical technologies that can reduce fuel consumption and emission of CO₂, the increased levels of which in the atmosphere are considered a major contributor to global warming. Various governmental policies around the world are providing financial incentives for vehicle electrification, setting standards for lower fleet-average fuel consumption and even mandating the introduction of electrified vehicles. In this context, this Undergraduate Final Project presents an application study of Lead-Acid batteries for Hybrid Electric Vehicles.

Keywords: *Hybrid Electric Vehicles, lead-acid batteries.*

Sumário

AGRADECIMENTOS	3
RESUMO	4
ABSTRACT	5
LISTA DE FIGURAS	7
LISTA DE TABELAS	8
INTRODUÇÃO	9
1 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	12
1.1 UM BREVE HISTÓRICO.....	12
1.1.1 <i>Veículos Elétricos</i>	12
1.1.2 <i>Veículos Elétricos Híbridos</i>	13
1.2 ARQUITETURA DOS VEÍCULOS ELÉTRICOS HÍBRIDOS	14
1.2.1 <i>VEH tipo Série</i>	14
1.2.2 <i>VEH tipo Paralelo</i>	16
1.2.3 <i>VEH tipo Série-Paralelo</i>	17
1.3 MERCADO ATUAL	18
1.4 CARACTERÍSTICAS GERAIS DAS BATERIAS.....	19
1.4.1 <i>Capacidade</i>	19
1.4.2 <i>Estado de Carga</i>	19
1.4.3 <i>Profundidade de descarga</i>	20
1.4.4 <i>Armazenamento de Energia</i>	20
1.4.5 <i>Energia Específica</i>	21
1.4.6 <i>Potência Específica</i>	21
1.4.7 <i>Números de Ciclos Profundos e Vida Útil da Bateria</i>	21
1.4.8 <i>Baterias para Aplicações em VEH</i>	21
1.5 BATERIA CHUMBO-ÁCIDO	23
2 ESTUDO DE CASO	28
2.1 VEÍCULOS ELÉTRICOS HÍBRIDOS.....	28
3 CONCLUSÕES	35
4 BIBLIOGRAFIA	36

Lista de Figuras

<i>Figura 1 - Perspectiva de mercado para vendas de veículos elétricos híbridos</i>	<i>11</i>
<i>Figura 2 - Projeção de vendas de veículos nos Estados Unidos em 2020, em milhões.....</i>	<i>11</i>
<i>Figura 3 - Arquitetura de um VEH do tipo Série.....</i>	<i>15</i>
<i>Figura 4 - Arquitetura de um VEH do tipo Paralelo.</i>	<i>16</i>
<i>Figura 5 - Arquitetura de um VEH do tipo Série-Paralelo</i>	<i>17</i>
<i>Figura 6 - Circuito para a medição do estado de carga.</i>	<i>20</i>
<i>Figura 7 - Reações químicas em uma Bateria Chumbo-Ácido.</i>	<i>24</i>
<i>Figura 8 - Ligação de elementos em série.....</i>	<i>25</i>
<i>Figura 9 - Componentes básicos de uma bateria.....</i>	<i>27</i>
<i>Figura 10 - Híbrido BR.....</i>	<i>29</i>
<i>Figura 11- Moura Log Diesel.....</i>	<i>29</i>
<i>Figura 12 - Componentes do Híbrido BR.....</i>	<i>29</i>
<i>Figura 13 - Arquitetura do Híbrido BR.</i>	<i>30</i>
<i>Figura 14 - Partida com a bateria ou gerador.</i>	<i>31</i>
<i>Figura 15 - Gráfico da Tensão (Rota 1).</i>	<i>32</i>
<i>Figura 16 - Gráfico da Corrente (Rota 1).....</i>	<i>32</i>
<i>Figura 17 - Gráfico da Tensão (Rota 2).....</i>	<i>32</i>
<i>Figura 18 - Gráfico da Corrente (Rota 2).....</i>	<i>33</i>

Lista de Tabelas

<i>Tabela 1 - Classificação das tecnologias de propulsão apoiadas pela ANFAVEA.....</i>	<i>10</i>
<i>Tabela 2 - Níveis de hibridação.....</i>	<i>18</i>
<i>Tabela 3 - Comparação entre tecnologias de baterias para VEH.....</i>	<i>22</i>
<i>Tabela 4 - Comparativo de custo e de logística de baterias para VEH.....</i>	<i>22</i>
<i>Tabela 5 - Relação do tipo de bateria e o tipo de carro.....</i>	<i>22</i>
<i>Tabela 6 - Análise dos resultados dos trechos da rota 1.....</i>	<i>33</i>
<i>Tabela 7 - Análise dos resultados gerais rota 1.....</i>	<i>33</i>
<i>Tabela 8 - Análise dos resultados dos trechos da rota 2.....</i>	<i>34</i>
<i>Tabela 9 - Análise dos resultados gerais rota 2.....</i>	<i>34</i>

Introdução

O setor da indústria automobilística brasileira é responsável por cerca de 25% do Produto Interno Bruto (PIB) industrial e 5% do PIB total, com um faturamento superior a US\$ 100 bilhões de dólares (ANFAVEA, 2014). Visando incrementar os índices de competitividade, a Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotivos (Anfavea) apresentou uma série de projetos ao Governo Federal para incentivar a indústria automotiva em toda a sua cadeia produtiva, aumentar a produção local e estimular a inovação, pesquisa e engenharia.

Como exemplo, tem-se o programa de Incentivo à Inovação Tecnológica e Adensamento da Cadeia Produtiva de Veículos Automotores (Inovar-Auto). Estima-se que até 2017 o Inovar-Auto seja responsável pela aplicação de cerca de R\$ 10 bilhões no setor para as áreas de inovação, pesquisa e desenvolvimento (BRAZIL AUTOMOTIVE GUIDE, 2014). Esse programa prevê um desconto de até 30 pontos percentuais no Imposto sobre Produtos Industrializados (IPI) para automóveis produzidos e vendidos no país. Entretanto, para ter direito a esse incentivo, os interessados devem cumprir uma série de contrapartidas, que vão aumentando gradualmente a partir do início do programa.

São beneficiárias do novo regime Inovar-Auto as empresas que:

- Produzem veículos no país.
- Não produzem, mas comercializam.
- Apresentam projeto de investimento no setor automotivo.

Em adição e alinhado ao Inovar-Auto, a Anfavea apresentou ao Governo Federal uma proposta para criação de um programa que incentive o desenvolvimento específico de novas motorizações para automóveis, comerciais leves e veículos pesados. Trata-se de um conjunto de medidas, com etapas graduais de implementação, de maneira a tornar viável comercialmente, a adoção de novas tecnologias de propulsão no mercado brasileiro, viabilizando a produção local. A implementação do programa visa inserir definitivamente, o Brasil entre os pólos de desenvolvimento de novas tecnologias, além de oferecer ao consumidor, veículos com alta eficiência energética e conseqüentemente, redução de consumo e de emissões de poluentes.

O cenário é favorável porque já há interesse da sociedade pelos modelos equipados com novas opções de motores. Em 2012, por exemplo, foram licenciados 117 veículos, 491 em 2013 e 855 em 2014 (CARTA DA ANFAVEA, 2015). Outro fator favorável ao desenvolvimento das novas tecnologias de propulsão é o parque industrial já instalado no Brasil. Além disso, os incentivos previstos no Inovar-Auto darão suporte ao progresso das pesquisas. Na proposta da Anfavea foram apresentadas ao Governo Federal seis classificações de tecnologia de propulsão (Tabela 1).

Tabela 1 - Classificação das tecnologias de propulsão apoiadas pela ANFAVEA.

Mild Híbrido	Full Híbrido	Plug-in Híbrido	Elétrico com Autonomia Estendida	Full Elétrico	Célula de Combustível
Motor a combustão interna combinado com um sistema auxiliar de tração.	Motor a combustão interna combinado com outro sistema de tração, que trabalham em conjunto ou separadamente.	Motor a combustão interna com outro sistema de tração, que trabalham em conjunto ou separadamente, com tecnologia de recarga externa.	Opera predominantemente como elétrico, sendo que o motor a combustão interna entra em operação quando a bateria se encontra na condição de carga ou para aumentar a performance.	Motor de propulsão elétrica, com energia proveniente de acumuladores elétricos.	Motor de propulsão elétrica, com conversão de energia química do hidrogênio em energia elétrica, proveniente de diferentes fontes.

Os cenários europeu, mundial (Figura 1) e dos Estados Unidos (Figura 2) para a venda de veículos elétricos híbridos (VEH) mostram que os tipos *start/stop* e *mild* irão dominar o mercado de veículos elétricos híbridos entre os anos 2020 e 2025. Diante deste cenário, é necessário que as baterias atendam aos requisitos e as características de carga e descarga demandadas por cada tipo de tecnologia de propulsão utilizada na fabricação dos veículos elétricos híbridos.

Dentre as diversas tecnologias de baterias que vêm sendo estudadas, destacam-se as baterias de chumbo-ácido, as quais constituem-se no objetivo de estudo deste projeto de pesquisa. De forma sucinta, este trabalho tem como objetivo geral o estudo da aplicação de baterias Chumbo-Ácido para Veículos Elétricos Híbridos e como objetivos específicos, estudar o mercado atual de veículos elétricos híbridos e o desenvolvimento e aplicação de baterias chumbo-ácido para veículos elétricos híbridos.

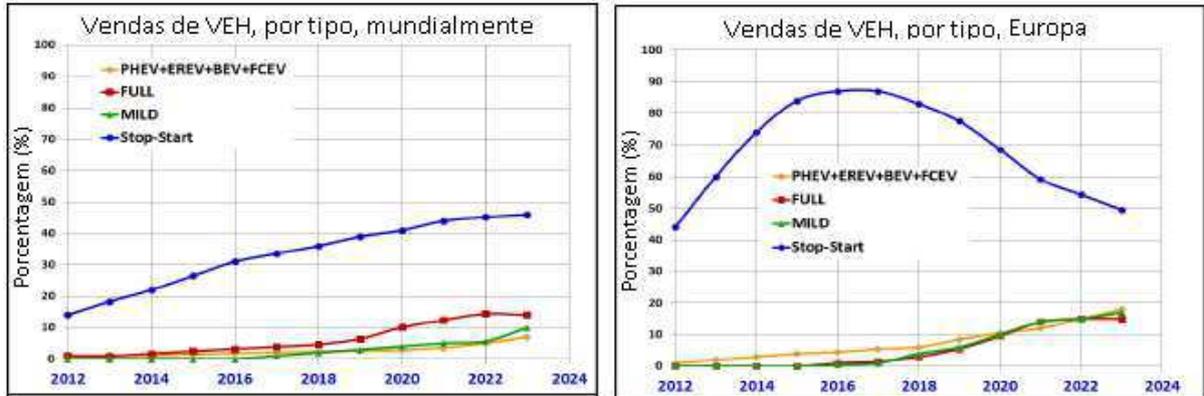


Figura 1 - Perspectiva de mercado para vendas de veículos elétricos híbridos. Adaptado de BENCHENTRITE (2014).

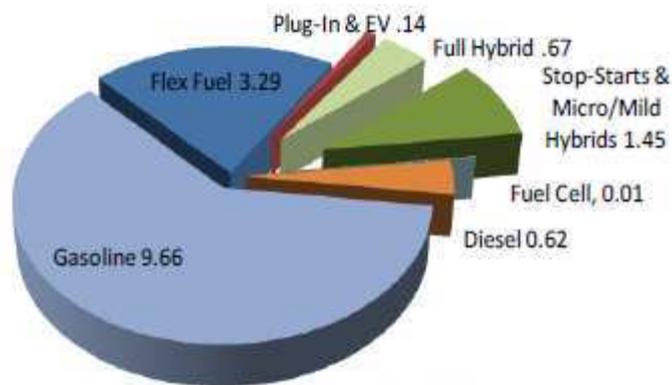


Figura 2 - Projeção de vendas de veículos nos Estados Unidos em 2020, em milhões. Fonte EIA (2010).

1 Fundamentação Teórica

1.1 Um breve Histórico

O desenvolvimento de motores de veículos a base de combustão interna e em especial, os automóveis, constitui-se em um dos grandes marcos da tecnologia moderna (EHSANI, et al., 2010). Entretanto, a grande quantidade de automóveis em uso no mundo tem causado problemas contínuos ao meio ambiente e ao cotidiano da população. Poluição do ar, aquecimento global, diminuição rápida das reservas de petróleo são problemas que afetam a todos. Nas últimas décadas, as atividades de pesquisa e desenvolvimento têm enfatizado o desenvolvimento de transportes de alta eficiência, de fontes renováveis e seguro (EHSANI, et al., 2010), dentre os quais destacam-se os veículos elétricos (VE), veículos elétricos híbridos (VEH) e os veículos com célula a combustível.

1.1.1 Veículos Elétricos

A invenção do primeiro modelo de veículo elétrico é atribuída a várias pessoas. Em 1828, Ányos Jedlik, um húngaro inventou um tipo primitivo de motor elétrico, criou um pequeno carro modelo que fora tracionado por seu motor. Em 1834, Thomas Davenport construiu um protótipo semelhante que funcionava em uma pista circular eletrificada curta (TECSOC, 2009). Já a primeira patente de carros movidos a combustão interna foi concedida à Charles Duryea em 1895 (AOGHS, 2015).

Inicialmente, a população não se sentia muito atraída a utilizar VE, pois a tecnologia ainda não estava matura o suficiente para competir com as carruagens. Velocidades de 15 km/h e autonomia de 16 km não agradavam aos consumidores. Com o passar dos anos, a tecnologia ficou melhor e começou a atrair a população pelo fato do VE chegar a uma velocidade media superiores a 24 km/h, velocidade esta que é superior à atingida em carruagens (WAKEFIELD, 1994).

O avanço técnico mais importante da época foi a invenção do freio regenerativa pelo francês M. A. Darracq em 1897. Este método permite recuperar a energia cinética do veículo durante a frenagem e recarregar as baterias. É uma das contribuições mais significativas para a tecnologia elétrica e para os VEH, pois contribui para a eficiência energética mais do que qualquer outra coisa na condução urbana. Com essas características, chegou-se a fabricar VE com autonomia de 100 km (EHSANI, et al., 2010).

Assim, os VE passaram a competir com os veículos movidos a combustão interna, o fato da autonomia limitada não era um problema na época, pois os veículos percorriam distancias curtas. Contudo, com a construção de estradas pavimentadas os VE passaram a perder mercado. Os automóveis a gasolina tornaram-se mais poderosos, mais flexíveis e, sobretudo, mais fáceis de manusear, e os VE começaram a desaparecer.

No contexto do desenvolvimento de VE, a tecnologia de bateria é a mais importante, o que acaba bloqueando o caminho de VE para o mercado. Grande esforço e investimento têm sido colocados em pesquisa de bateria, com a intenção de melhorar o desempenho para atender a exigência dos VE. Infelizmente, o progresso tem sido muito limitado. O desempenho é muito aquém da exigência, especialmente a capacidade de armazenamento de energia por unidade de peso e volume. Esta capacidade de armazenamento de energia baixa das baterias limita os VE para apenas algumas aplicações específicas, como em aeroportos, estações ferroviárias, rotas de entrega de correio, campos de golfe, e assim por diante.

Na verdade, estudos básicos mostram que o VE nunca será capaz de desafiar o veículo a combustível líquido mesmo com o valor otimista da capacidade de energia da bateria (GAO, T., EHSANI, M. 2002). Assim, nos últimos anos, as pesquisa de tecnologia de veículos estão investindo estudos em VEH, bem como veículos com célula a combustível.

1.1.2 Veículos Elétricos Híbridos

O conceito de um VEH é quase tão antigo quanto a criação do mesmo. O objetivo primário, no entanto, não foi o de diminuir o consumo de combustível, mas sim para auxiliar o motor de combustão interna para fornecer um nível de desempenho aceitável. De fato, inicialmente, a engenharia da combustão interna era menos avançada do que a engenharia de motores elétricos (MI, et al., 2011).

Dr. Ferdinand Porsche da Alemanha construiu provavelmente o primeiro VEH do mundo em 1898, usando um motor de combustão interna para girar um gerador que fornecia energia para motores elétricos localizados nos eixos das rodas (HEALEY, 2014).

Os VEH, juntamente com os VE, desapareceram em 1930 e as empresas de energia elétrica de carros todas falharam. Havia muitas razões que levaram ao desaparecimento dos VE e VEH. Quando comparado com a gasolina carros, VE e VEH:

- Eram mais caros do que os carros a gasolina, devido às grandes baterias usadas;
- Foram menos potentes do que carros a gasolina devido ao poder limitado da bateria a bordo;
- Tiveram alcance limitado entre cada carga;
- Precisavam de muitas horas para recarregar a bateria a bordo.

Além disso, as áreas urbanas e rurais não tinham acesso à eletricidade para carregar carros elétricos e híbridos. O grande avanço em carros movidos a gasolina também acelerou o desaparecimento dos VE e VEH. A produção da linha de montagem de veículos movidos a gasolina, como o Modelo-T por Henry Ford, fez estes veículos muito mais acessíveis do que os veículos elétricos e híbridos (MI, et al., 2011).

O esforço mais significativo no desenvolvimento e comercialização de VEH foi feita por fabricantes japoneses. Em 1997, quando o primeiro carro elétrico híbrido moderno, o Toyota Prius, foi vendido no Japão. Este carro, junto com Honda Insight e o Civic Hybrid, estão disponíveis nos Estados Unidos desde 2000 (MI, et al., 2011). Estes primeiros VEH marcaram uma mudança radical nos tipos de carros oferecidos ao público: os veículos que aproveitam os benefícios de ambos os VE bateria e veículos convencionais movidos a gasolina.

1.2 Arquitetura dos Veículos Elétricos Híbridos

Os automóveis convencionais de motor a combustão interna apresentam bom desempenho e operação de longa distância ao utilizarem combustíveis, a base de petróleo, que possuem alta densidade de energia. Contudo estes automóveis possuem a desvantagem de baixa economia de combustível e problemas de poluição ambiental. Já os VE movidos a baterias, possuem vantagens sobre os automóveis convencionais a motor de combustão interna, os VE possuem alta eficiência de energia e poluição ambiental zero. No entanto, o desempenho é muito inferior se comparado aos de combustão interna, devido à baixa densidade de energia que as baterias possuem. Os VEH ao utilizarem duas fontes de energia apresentam as vantagens dos VE e dos veículos a combustão interna e assim se sobressaem em relação às desvantagens individuais (EHSANI, et al., 2007). Dentro das diversas arquiteturas dos VEH, destacam-se a do VEH do tipo série, paralelo e o série-paralelo.

1.2.1 VEH tipo Série

É apresentada na Figura 3, a configuração de um VEH do tipo série. Para esta arquitetura, o motor a combustão interna é o conversor de energia primário que converte a energia original da gasolina em potência mecânica. A saída mecânica do motor de combustão é então convertida em eletricidade utilizando um gerador. O motor elétrico move a unidade usando a eletricidade final gerada pelo gerador de energia elétrica ou a energia armazenada na bateria. Nesta configuração, o motor elétrico pode receber energia elétrica diretamente a partir do motor, ou a partir da bateria, ou ambos. Uma vez que o motor é dissociado das rodas (não há contato mecânico), a velocidade do motor pode ser controlada independentemente da velocidade do veículo. Isto não só simplifica o controle do motor, mas pode permitir a operação do motor à velocidade ideal para obter a melhor economia de combustível (MI, et al., 2011). Ele também fornece flexibilidade na localização do motor do veículo. Com base nas condições de funcionamento do veículo, os componentes de propulsão de um VEH do tipo série podem operar em diferentes combinações:

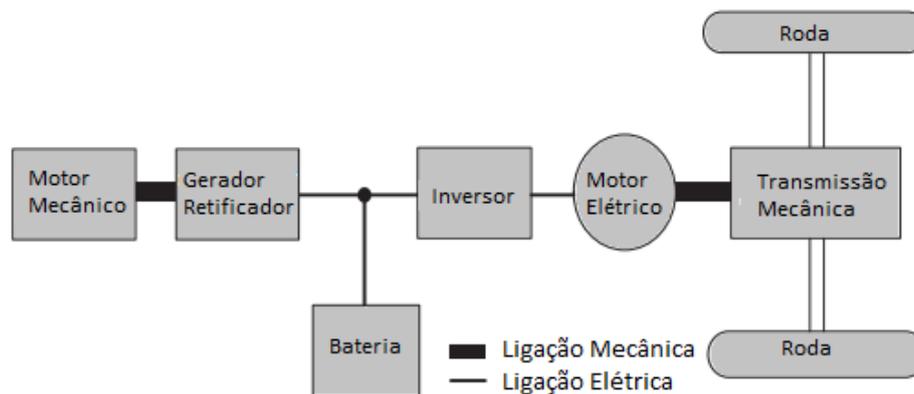


Figura 3 - Arquitetura de um VEH do tipo Série. Adaptado de (MI, et al 2011).

- **Bateria:** Quando a bateria tem energia suficiente, e a demanda de alimentação do veículo é baixa, o motor de combustão interna é desligado, e o veículo é alimentado apenas pela bateria.
- **Combinado:** Em alta demanda de energia, o motor a combustão está ligado em conjunto com a bateria e eles fornecem energia para o motor elétrico.
- **Motor:** Durante o cruzeiro e em demandas moderadamente elevados de energia, o conjunto do motor a combustão está ligado. A bateria não é carregada nem descarregada. Isto ocorre devido ao fato de que o estado de carga da bateria já pode estar em um nível elevado.
- **Divisão de energia:** Quando o motor a combustão é ligado, e a demanda de energia do veículo for inferior à potência do motor a combustão, e o estado de carga da bateria é baixo, então uma parte da energia do motor a combustão é usado para carregar a bateria.
- **Carga estacionária:** A bateria é carregada a partir do motor a combustão com o veículo parado.
- **Freio regenerativo:** O motor elétrico é operado como um gerador que converte a energia cinética do veículo em energia elétrica e carrega a bateria.

Os VEH do tipo série se destacam por: sua flexibilidade na localização do conjunto do motor-gerador; apresentam alta simplicidade na ligação dos componentes de transmissão; e aptidão para percursos curtos (zonas urbanas). Contudo, neste tipo de arquitetura é solicitado três componentes de propulsão: o motor mecânico, o gerador e o motor elétrico. Além disto, o motor mecânico deve ser projetado para a potência máxima que o veículo pode exigir mesmo o veículo operando abaixo da potência máxima a maior parte do tempo. E por fim, todos os três componentes de propulsão precisam ser dimensionados para uma potência máxima de longa distância, porque a carga das baterias se esgota rapidamente, e o motor mecânico é acionado para fornecer toda propulsão do veículo através do gerador (HUSAIN, 2005).

1.2.2 VEH tipo Paralelo

É apresentada na Figura 4 a configuração de um VEH do tipo paralelo. Nesta configuração, o motor a combustão interna e o motor elétrico podem ambos fornecer energia para as rodas. O motor a combustão e o motor elétrico são acoplados à transmissão final por meio de um mecanismo composto por: embreagem, correias, polias e engrenagens. Tanto o motor a combustão quanto o motor elétrico podem fornecer energia para a unidade final, tanto no modo combinado, ou cada um separadamente. O motor elétrico pode ser utilizado como um gerador para recuperar a energia cinética durante a frenagem ou absorver uma porção da energia do motor a combustão (MI, et al., 2011). O VEH pode ser usado nos seguintes modos:

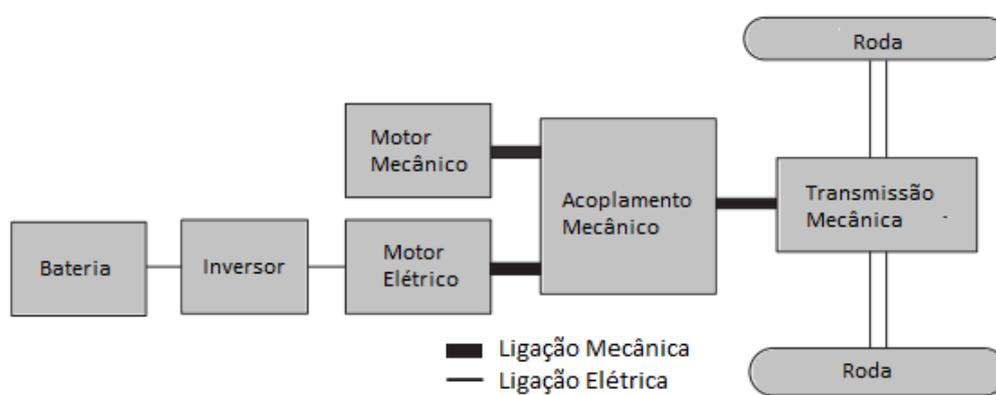


Figura 4 - Arquitetura de um VEH do tipo Paralelo. Adaptado de (MI, et al., 2011).

- Motor elétrico: Quando a bateria tem energia suficiente, e a demanda de alimentação do veículo é baixa, então o motor a combustão é desligado, e o veículo é alimentado pelo motor elétrico e só bateria.
- Combinado: Em alta demanda de potência, o motor a combustão é ligado e o motor elétrico também fornece energia para as rodas.
- Motor a combustão: Durante o cruzeiro e em demandas moderadamente de alta potência, o motor a combustão interna fornece toda a energia necessária para conduzir o veículo. O motor elétrico permanece inativo.
- Divisão de energia: Quando o motor a combustão está ligado, mas a demanda de alimentação do veículo é baixa e o estado de carga da bateria também é baixo, então uma parte da potência do motor a combustão é convertida em energia elétrica pelo motor elétrico para carregar a bateria.
- Carregamento parado: A bateria é carregada, executando o motor elétrico como um gerador e impulsionado pelo motor a combustão, com o veículo em repouso.
- Freio regenerativo: O motor elétrico é operado como um gerador que converte a energia cinética do veículo em energia elétrica e a armazena na bateria. Note-se que, no modo de regeneração, é, em princípio, possível rodar o motor a combustão interna, e assim fornecer corrente adicional para carregar a bateria mais rapidamente e comandar seu torque em conformidade, ou seja, para combinar a entrada de energia da bateria total.

Neste caso, os controladores de motores e automóveis têm de ser adequadamente coordenados.

Os VEH do tipo paralelo possuem a vantagem de utilizar apenas dois componentes de propulsão o motor mecânico e o motor elétrico (que pode funcionar como motor ou gerador). O dimensionamento do motor mecânico e o do motor elétrico são menores do que em um VEH do tipo série. Contudo, os VEH do tipo paralelo apresentam um alto grau de complexidade no controle, pois o fluxo de energia tem que ser regulado e combinado de duas fontes de energia paralelas. E para a realização desta combinação de energia entre o motor mecânico e o motor elétrico é necessário um dispositivo mecânico complexo (HUSAIN, 2005).

1.2.3 VEH tipo Série-Paralelo

A arquitetura de um VEH do tipo série-paralelo é mostrada na Figura 5, ele incorpora as características dos VEH série e paralelo. Portanto, ele pode ser operado como uma VEH série ou paralelo. Em comparação com um VEH série, o VEH série-paralelo adiciona uma ligação mecânica entre o motor e a transmissão final, de modo que o motor pode conduzir as rodas diretamente. Ao ser comparado com um VEH paralelo, o VEH série-paralelo adiciona um segundo motor elétrico que serve principalmente como um gerador.

O fato do VEH série-paralelo poder operar em ambos os modos paralelo e em série, a eficiência do combustível e dirigibilidade podem ser otimizada com base na condição de funcionamento do veículo. O aumento do grau de liberdade no controle faz com que o VEH série-paralelo se torne uma escolha popular. No entanto, devido à complexidade e ao aumento dos componentes, este veículo é geralmente mais caro do que os VEH séries e paralelos (MI, et al., 2011).

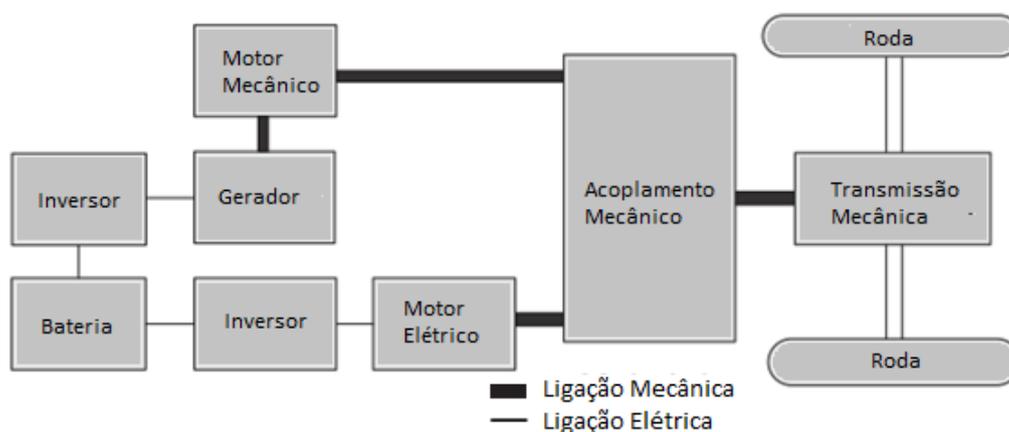


Figura 5 - Arquitetura de um VEH do tipo Série-Paralelo. Adaptado de (MI, et al., 2011).

1.3 Mercado Atual

Hoje, os carros híbridos cobrem uma gama de tecnologias amplamente caracterizadas por medidas em que a energia elétrica é utilizada para a propulsão em um veículo a combustão interna. Em uma extremidade do espectro está o *micro-hybrid* um carro que não é verdadeiramente um híbrido, uma vez que nenhuma energia elétrica é fornecida para o apoio à tração, mas apresenta um arranque turbinado de 2 a 4 kW, no qual o combustível é salvo quando o veículo está parado, e um pouco de energia mecânica é capturado durante a frenagem. Na outra extremidade da gama, está o híbrido *plug-in* (PHEV – *plug-in hybrid*), em que um motor elétrico de 40 a 100 kW é capaz de impulsionar o carro por cerca de 16 a 64 quilômetros (ANDERMAN, 2014).

Além dos híbridos, os VE usam um único motor elétrico com um sistema de transmissão totalmente elétrico alimentado por uma bateria ou uma célula a combustível (FC – *fuel cell*). Enquanto os veículos movidos a FC estão em desenvolvimento desde meados dos anos 1990 e ainda são de interesse, questões de infraestrutura parecem limitar a sua viabilidade comercial para o futuro previsível.

O debate sobre o nível certo de eletrificação ou hibridização se intensificou recentemente. Por um lado, um baixo nível de hibridação fornece apenas um pequeno benefício de combustível, seu custo relativamente baixo facilita a introdução de alto volume e pode, assim, produzir rapidamente um impacto notável no consumo de combustível da frota da média. No outro extremo, os VE e os PHEV oferecem significativamente o consumo de combustível mais baixo por veículo, mas o seu custo muito mais elevado (ANDERMAN, 2014).

Existem vários níveis de hibridação possíveis. Eles são geralmente classificados de acordo com i) as funções que eles fornecem, ou ii) a relação entre a potência do motor elétrico de potência total. Na Tabela 2 é descrito as várias categorias dos VEH e suas principais funções.

Tabela 2 - Níveis de hibridação. Adaptado de (ANDERMAN, 2014).

	1	2	3	4	5	6	7	8
Categoria	Micro-1	Micro-2	Mild-1	Mild-2	Moderate	Strong	Parallel Plug-in	Ext.-Range EV (EREV)
Atributo Principal	Start/Stop	Freio Regenerativo	Assistência no arranque	Assistência média ao motor	Assistência moderada ao motor	Motor Elétrico Limitado	Motor Elétrico Estendido	Motor Elétrico Muito Estendido
Potência Elétrica	2-4 kW	2-4 kW	5-12 kW	10-15 kW	12-20 kW	25-60 kW	40-100 kW	70-130 kW
Tensão de operação	14	14-24	48	100-140	100-150	150-350	150-600	200
Exemplo	Majoria dos carros da Europa	Mazda Suzuki	Desenvolvimento	GM Malibu LaCrosse	Honda Civic	Toyota Prius Ford Fusion	Ford C-max	Chery Volt
Partida à frio	Desejado							
Partida Start/stop								
Freio Regenerativo								
Assistência ao alternador								
Torque Suave								
Assistência no arranque								
Assistência ao motor								
Motor Elétrico								
Código de cores: Usado Completo Usado Moderado Usado Limitado Usado Baixo Sem Uso								

1.4 Características Gerais das Baterias

Os parâmetros importantes para baterias de VEH são:

- O custo da energia utilizável em condições de descarga de alta potência;
- A sua vida útil de aplicação;
- O volume e peso do dispositivo de armazenamento de energia capaz de fornecer a alimentação necessária para a duração de tempo necessária, derivada a partir da energia específica (Wh/kg) e a potência específica (W/kg).

Baterias eletroquímicas ou somente "baterias", são dispositivos eletroquímicos que convertem energia elétrica em energia química potencial durante o carregamento, e convertem energia química em energia elétrica durante a descarga. Uma bateria é composta de várias células empilhadas em conjunto (EHSANI, et al., 2010). Uma célula é uma unidade independente e completa que possui todas as propriedades eletroquímicas. A seguir são apresentadas as características técnicas das baterias.

1.4.1 Capacidade

A quantidade de carga livre gerado pelo material ativo no eletrodo negativo e consumido pelo eletrodo positivo é chamado capacidade da bateria. A unidade SI da capacidade da bateria é o *Coulomb* (C). Uma unidade mais geral para a capacidade da bateria é de Amperes-hora ($1\text{ Ah} = 3600\text{ C}$). Por exemplo, uma bateria de 20 Ah pode fornecer uma corrente de 1 A, durante 20 horas ou 2 A durante 10 horas, ou 20 A durante 1 hora. Mas, em geral, a capacidade da bateria depende da taxa de descarga (PEREZ, 1993).

1.4.2 Estado de Carga

O estado de carga ou *State of Charge* (SoC) é a capacidade atual da bateria. É a quantidade de capacidade que permanece após uma condição de carga completa (HUSAIN, 2005). O circuito de medição do estado de carga da bateria é mostrado na Figura 6.

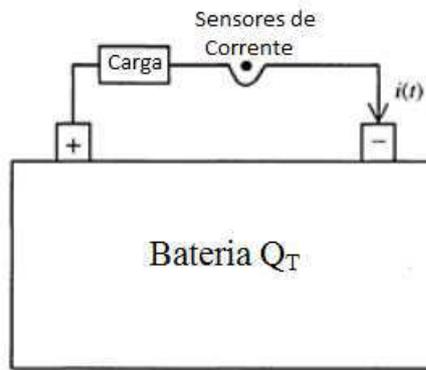


Figura 6 - Circuito para a medição do estado de carga. Adaptado de (HUSAIN, 2005).

A corrente é a taxa de variação de carga dada pela equação $i(t) = \frac{dq}{dt}$, em que q é a carga que se move através do circuito. O estado teórico instantânea de carga $SoC_{T(t)}$ é a quantidade de carga positiva equivalente no eletrodo positivo. Se o estado de carga é Q_T no tempo inicial t_0 , então $SoC_{T(t_0)} = Q_T$. Para um intervalo de tempo dt , tem-se que: $dSoC_T = -dq$, ou seja, $dSoC_T = -i(t)dt$.

Integrando a partir do momento t_0 inicial para o tempo final t , a expressão de estado instantâneo de carga é obtida como se segue: $SoC_T = Q_T - \int_{t_0}^t i(\tau)d\tau$.

1.4.3 Profundidade de descarga

A profundidade de descarga ou *Depth of Discharge* (DoD) é a percentagem da capacidade da bateria (capacidade nominal) para a qual uma bateria é descarregada (HUSAIN, 2005). A profundidade da descarga é dada por: $DoD(t) = \frac{Q_T - SoC_T(t)}{Q_T} \times 100\%$, ou seja, a profundidade de descarga é igual a: $\frac{\int_{t_0}^t i(\tau)d\tau}{Q_T} \times 100\%$.

1.4.4 Armazenamento de Energia

A quantidade de energia armazenada numa bateria é dependente da tensão da bateria e a quantidade de carga armazenada dentro. O *watt-hora* ou *Wh* é a unidade SI para a energia armazenada. Assumindo uma tensão constante para as baterias tem-se: $E(Wh) = V \times C$, onde V é a tensão e C representa a capacidade em Ah. A capacidade da bateria varia com a taxa de descarga, e a corrente de descarga associada afeta o valor da tensão. A energia armazenada não é, portanto, uma quantidade constante e é uma função de duas variáveis, a saber, a tensão e a capacidade da bateria.

1.4.5 Energia Específica

Energia específica significa o quanto de energia elétrica pode ser armazenado por unidade de massa da bateria. A unidade SI para essa quantidade é *watt*-hora por quilograma ($\frac{Wh}{kg}$). Novamente, a energia específica não é um parâmetro constante uma vez que a energia armazenada varia com a taxa de descarga.

1.4.6 Potência Específica

Potência específica significa o quanto de energia pode ser fornecido por quilograma de bateria. Note-se que esta quantidade é dependente da carga servido pela bateria e, assim, é altamente variável e anômala. A unidade SI de potência específica é *watt* por quilograma ($\frac{W}{kg}$). Potência específica é a capacidade da bateria para fornecer energia. Uma potência específica mais elevada indica que é possível fornecer e retirar a energia da bateria rapidamente.

1.4.7 Números de Ciclos Profundos e Vida Útil da Bateria

É a medida da quantidade de ciclos que a bateria pode efetuar, para certa profundidade de descarga. Por exemplo, uma bateria pode suportar 1000 ciclos de carga e descarga com 20% de profundidade de descarga. A mesma bateria suporta uma quantidade menor de ciclos caso a profundidade de descarga seja maior, ou seja, para uma ciclagem com descarga de 50% de profundidade de descarga a bateria pode suportar 300 ciclos. Esta especificação é muito importante, uma vez que afeta o tempo de vida útil da bateria em termos de número de ciclo profundo. Assim, em geral, deve reduzir as chances de profundidade de descargas muito elevadas em baterias, a fim de limitar os custos de operação.

1.4.8 Baterias para Aplicações em VEH

Existem atualmente quatro tecnologias de armazenamento de energia usadas em VEH: chumbo-ácido, níquel-hidreto metálico (NiMH), as baterias de íons de lítio, e os ultra capacitores (UCaps). Estas são as únicas tecnologias de interesse para o um futuro previsível (ANDERMAN, 2014). Nas Tabela 3 e Tabela 4 estão fornecidos uma comparação genérica das tecnologias. A tabela foi montada com base em dados de ambas as empresas de automóveis e desenvolvedores de bateria, e deve ser tomada como representando características gerais de dispositivos de alta potência projetadas para aplicações em VEH.

Tabela 3 - Comparação entre tecnologias de baterias para VEH. Adaptado de (MI, et al., 2011).

Tecnologia da bateria	Vida útil	Eficiência (%)	Potência específica	Energia Específica
Chumbo-ácido	500-800	50-92	150-400	30-40
NiMH	500-1000	66	250-1000	30-80
Li ion	400-1200	80-90	200-1500	150-250
Ultracapacitor	1000000	90	1000-9000	0,5-30

Tabela 4 - Comparativo de custo e de logística de baterias para VEH. Adaptado de (ANDERMAN, 2014).

Parâmetro	Chumbo-Ácido	NiMH	Íons de Lítio	Ultra Capacitores
Custo do módulo (\$/kWh)	130	950	1500	25000
Quantidade de fábricas	Grande número e expandindo	Quantidade estabilizada	Quantidade estabilizada	Quantidade estabilizada
Tecnologia para Reciclagem	Estabilizada	Estabilizada para o aço	Sem desenvolvimento	Sem desenvolvimento
Disponibilidade de materiais	Alta	Moderada	Alta	Alta
Segurança da utilização	Alta	Alta	Moderada	Moderada

Quando os veículos híbridos foram introduzidos pela primeira vez no final de 1990, as baterias feitas de NiMH foram escolhidas para configurações de alta tensão, e as baterias de chumbo-ácido foram promovidas para o nível mais baixo de hibridização. As baterias feitas de NiMH ainda são dominantes no mercado de híbridos de alta tensão, mas o seu monopólio foi encerrado pela tecnologia baterias de íons de lítio, que começou a ganhar participação de mercado em torno de 2009 e espera-se aumentar continuamente a sua parte com o tempo (ANDERMAN, 2014). Na Tabela 5 é fornecida uma visão geral das perspectivas relativas de tecnologias de armazenamento de energia para capturar os vários segmentos de mercado híbrido de veículos.

Tabela 5 - Relação do tipo de bateria e o tipo de carro. Adaptado de (MONAHOV, 2014).

Tipo de Veículo	Convencional	Híbrido								
		Micro-1	Micro-2	Mild-1	Mild-2	Moderate	Strong	Parallel PHEV	Ex-Range PHEV	
Potência Elétrica (kW)	2-4	2-4	2-4	5-12	10-15	12-20	25-60	40-100	70-130	
Tensão (V)	12	12	12-24	48	45-120	100-150	150-350	150-600	200	
Tipo de bateria	Chumbo-Ácido									
				NiMH						
			Li - ion							
	Combinação									

Dentre as diversas tecnologias de baterias, este trabalho está focado no uso de baterias de chumbo-ácido para a aplicação em VEH.

1.5 Bateria Chumbo-Ácido

A conversão de energia química em energia elétrica (conversão eletroquímica), como a que ocorre em acumuladores, por exemplo, é um dos processos mais eficientes de conversão de energia, sendo muito mais eficiente que a conversão de energia química em energia mecânica (conversão termoquímica), como o que ocorre na combustão de gasolina ou álcool em um motor. Do ponto de vista termodinâmico essa eficiência se deve ao fato de que a conversão eletroquímica não está limitada pelo teorema de *Carnot* que diz que a eficiência da conversão é relacionada com a diferença de temperatura entre fontes frias e quentes (DINIZ, 1995).

A armazenagem de energia em um acumulador é possível por causa da diferente tendência que diferentes substâncias têm de dar ou de receber elétrons. Elétrons são as partículas que transportam eletricidade. A quantidade de elétrons que se pode fazer passar por um circuito é o que chamamos de capacidade. Para esclarecer o funcionamento de um acumulador será dado um exemplo em termos de um acumulador de chumbo-ácido.

O bióxido de chumbo (PbO_2), é uma substância que possui uma grande tendência de receber elétrons, enquanto que o chumbo metálico (Pb), tem uma grande tendência de doar elétrons. Assim, se colocarmos em contato chumbo metálico com bióxido de chumbo, e estabelecermos condições para que elétrons possam caminhar de um para outro, a transferência de elétrons do chumbo para o bióxido de chumbo se dará com extrema facilidade. Para se estabelecer estas condições é importante saber exatamente o que está ocorrendo com o material ativo (isto é, chumbo e bióxido de chumbo), após a transferência dos elétrons. Em quais substâncias químicas o chumbo e o bióxido de chumbo irão se transformar após a transferência de elétrons, irá depender do meio em que eles se encontram. No acumulador de chumbo-ácido, esse meio é uma solução de ácido sulfúrico. Nesse caso, o chumbo metálico ao perder elétrons e o bióxido de chumbo ao receber esses elétrons se transforma em sulfato de chumbo (PbSO_4). Os íons sulfato necessários para essa transformação, são provenientes do ácido sulfúrico (H_2SO_4) (DINIZ, 1995). O processo é apresentado na Figura 7.

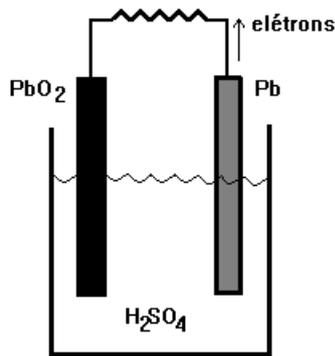
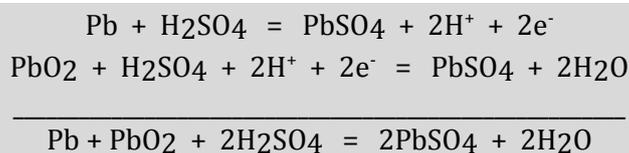


Figura 7 - Reações químicas em uma Bateria Chumbo-Ácido. Adaptado de (DINIZ, 1995).



Para que um acumulador seja útil, é importante fazer com que os elétrons transferidos no processo descrito acima, passem por um circuito elétrico externo e realizem um trabalho, por exemplo, girando um motor elétrico, acendendo uma lâmpada, etc.

Finalmente, o dispositivo só é considerado um acumulador se possibilitar que os elétrons transferidos do chumbo ao bióxido de chumbo possam ser transferidos no sentido contrário, através da aplicação de uma corrente elétrica externa, no presente caso, regenerando o chumbo e o bióxido de chumbo consumido (DINIZ, 1995).

Os elétrons, por serem partículas de carga negativa, são atraídos por regiões de potencial elétrico positivo e repelidos por regiões de potencial elétrico negativo. Assim, dizemos que num acumulador como o descrito acima, o chumbo é o polo negativo e o bióxido de chumbo é o polo positivo do acumulador. Como esse material normalmente é utilizado na forma de placas (grades de chumbo revestidas por material ativo), falamos de placa positiva (placa de bióxido de chumbo) e placa negativa (placa de chumbo) (DINIZ, 1995).

A configuração mais simples para um acumulador seria a de uma placa negativa e uma placa positiva, separadas por um separador poroso e imersas em uma solução de ácido sulfúrico (Figura 7).

Esta unidade constitui a célula. Quando o acumulador está carregado, a placa positiva e a placa negativa são constituídas essencialmente de bióxido de chumbo e chumbo, respectivamente. Durante a descarga, as placas sofrem reações e ambas são convertidas a sulfato de chumbo. Paralelamente, a solução de ácido sulfúrico diminui em concentração (a densidade da solução abaixa). Um sistema como este,

apresenta uma diferença de potencial entre as placas de cerca de dois volts. Essa tensão é uma função principalmente da densidade da solução de ácido sulfúrico absorvida pelas placas.

A quantidade de carga que essas placas podem fornecer é uma função da quantidade de material ativo presente. Se dobrarmos o tamanho das placas, teoricamente dobraremos a quantidade de carga disponível. Ao invés de aumentarmos o tamanho das placas, é possível ligar outra placa positiva à placa positiva original e outra placa negativa à placa negativa original (esse tipo de ligação é chamado de ligação em paralelo). Desse modo obtém-se o que é denominado elemento (DINIZ, 1995).

Caso seja necessário aumentar a diferença de potencial do acumulador, deve-se ligar dois ou mais elementos, de modo que as placas positivas se liguem às placas negativas (esta ligação é chamada de ligação em série). Elementos ligados em série devem estar em compartimentos separados (Figura 8). Isto é, a solução de um elemento não deve entrar em contato com a de outro elemento. Se isto ocorresse, os elementos se descarregariam, pois existiria um circuito elétrico fechado através da solução. Com a ligação em série, pode-se aumentar a tensão de dois em dois volts.

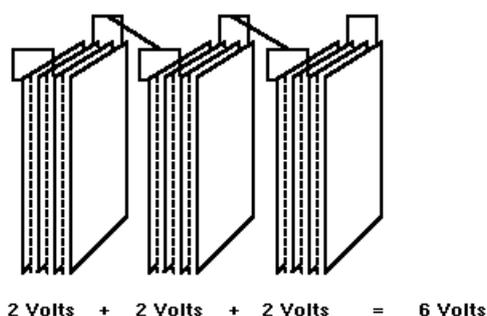


Figura 8 - Ligação de elementos em série. Adaptado de (DINIZ, 1995)

Nota-se que existe uma relação dimensional das placas com as propriedades elétricas do acumulador. Estas relações podem ser ainda mais detalhadas se considerarmos as condições em que o acumulador irá operar. Se o acumulador sofre uma descarga lenta, à medida que o ácido sulfúrico absorvido pelas placas é consumido, mais ácido que está presente na região entre as placas poderá se difundir para o interior das placas e garantir a continuidade da descarga. Para tal, a porosidade dessas placas é importante. Nesse tipo de processo a espessura das placas não é um fator tão importante quanto é no caso de descarga rápida (a altas correntes). Neste caso, o consumo de ácido nas placas é maior que a velocidade de difusão do ácido. Assim, é importante que as placas sejam finas para que a difusão seja facilitada, isto é, para que a maior parte do material ativo esteja na superfície, e não no interior das placas (DINIZ, 1995).

Para que uma bateria possua uma capacidade adequada à quantidade de material ativo nas placas, é importante que haja quantidade suficiente de ácido para a reação de descarga. Essa quantidade é uma função do espaço ocupado pelas placas e separadores.

Durante o processo de recarga, além das reações de conversão do sulfato de chumbo em chumbo metálico na placa negativa e bióxido de chumbo na placa positiva, ocorrem sempre outras reações paralelas indesejáveis. Na placa positiva pode ocorrer uma oxidação da grade metálica, ou seja, uma corrosão das grades positivas. Este processo é acelerado em condições de alta temperatura e de tensão excessiva utilizada na recarga. As ligas utilizadas nas grades e o contato entre massa e grade são fatores importantes na proteção contra corrosão. Ainda na placa positiva, pode ocorrer um consumo de oxigênio proveniente da água presente na solução. Na placa negativa pode ocorrer um consumo de íons de hidrogênio. O consumo de hidrogênio e de oxigênio corresponde exatamente ao consumo de moléculas de água. O consumo de água depende em grande parte da presença de contaminantes e composição das ligas de chumbo utilizadas nas grades, e serão mencionados posteriormente.

Como já foi mencionado, do ponto de vista prático, um acumulador de chumbo-ácido é essencialmente constituído por placas de material ativo (bióxido de chumbo e chumbo) suportadas em grades de chumbo. A função principal das grades de chumbo é de suporte mecânico e contato elétrico. Na descarga, os elétrons saem da placa de chumbo (placa negativa) pela grade e chegam à placa de bióxido de chumbo (placa positiva), também pela grade. As grades são ligadas, de um modo específico, entre si, por peças de chumbo que devem também dar sustentação mecânica ao conjunto e permitir a boa condução de eletricidade. As placas são imersas em uma solução de ácido sulfúrico. Entre as placas positivas e negativas existe um separador para impedir o contato direto entre elas. No entanto o separador deve ser poroso para permitir a condução de cargas elétricas de uma placa a outra, através da solução. Todo esse conjunto é colocado em uma caixa que deve ser robusta o suficiente para comportar o sistema em condições de uso e evitar qualquer vazamento de solução. A caixa deve possuir terminais para contato elétrico com os circuitos externos. Em geral a caixa possui uma tampa que é selada na parte superior da mesma, tampa esta que pode ou não possuir orifícios para a manutenção do acumulador (adição de água ou solução de ácido sulfúrico), mas que obrigatoriamente permitirá a saída de gases eventualmente gerados pela bateria.

Desse modo, podemos resumir como componentes de um acumulador de chumbo (Figura 9):

- Placas: material ativo (chumbo e bióxido de chumbo) e grades;
- Separadores;
- Pequenas peças de chumbo;
- Caixa/Tampa;
- Solução de ácido sulfúrico.

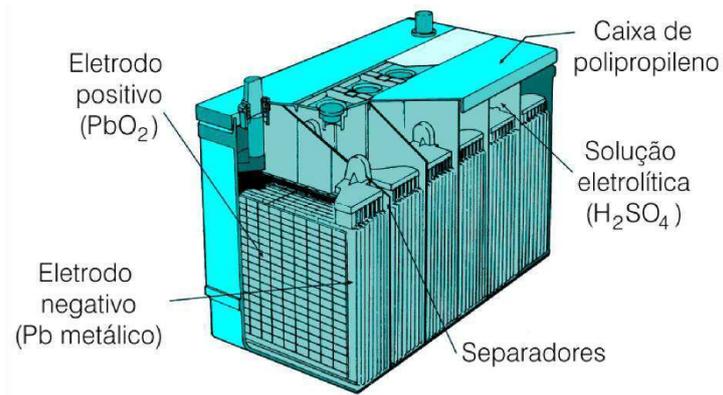


Figura 9 - Componentes básicos de uma bateria. Fonte Baterias Chumbo-Ácido (2013)

2 Estudo de caso

Este trabalho utiliza-se dos conceitos de um projeto da Acumuladores Moura S/A para a utilização de uma nova tecnologia de baterias para veículos elétricos híbridos.

2.1 Veículos Elétricos Híbridos

O projeto do VEH trata do primeiro conceito de ônibus híbrido no Brasil com baterias de chumbo-ácido ele possui tecnologia 100% brasileira. Essa tecnologia resulta na baixa emissão de poluentes e na economia de combustível. O veículo tem duas fontes de energia, Grupo Motor Gerador e Baterias.

As seguintes empresas fazem parte deste projeto: Mercedes-Benz que fornece o ônibus todo equipado, a WEG fornece os geradores e os componentes do motor elétrico, a Acumuladores Moura S/A e a Eletra que é empresa pioneira na fabricação de ônibus elétricos e de ônibus híbridos. Estas empresas são responsáveis pela construção do veículo, a parte do motor elétrico e freio regenerativo, e a aplicação de baterias. A Moura é responsável por propor melhorias na eficiência de regeneração das baterias do VEH. Para isto, ela vem investindo esforços em pesquisa e desenvolvimento de novos componentes e aditivos para serem aplicados nas baterias.

O protótipo de ônibus híbrido possui o nome de Híbrido BR (Figura 10). No Híbrido BR apenas o motor elétrico movimenta o veículo, caracterizando a tecnologia de VEH do tipo série e de um híbrido do tipo *mild-2* (Tópico 1.3). A energia para o motor elétrico vem de um grupo motor gerador, formado por um motor Mercedes-Benz movido a Diesel ou a Diesel de cana e um gerador trifásico WEG. O modelo tem um banco de 48 baterias chumbo-ácida, desenvolvido pela Moura o modelo 12ML65 (Figura 11), que complementa a energia disponível para o motor elétrico. É apresentada na Figura 12 a representação dos componentes do Híbrido BR.



Figura 10 - Híbrido BR.



Figura 11- Moura Log Diesel. Fonte Catálogos MOURA (2014).

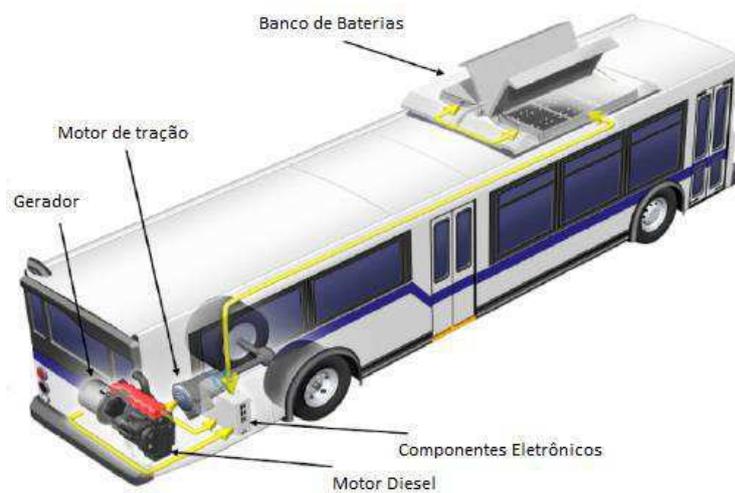


Figura 12 - Componentes do Híbrido BR.

Em relação ao modo de operação, tem-se que quando o Híbrido BR está freando, o motor elétrico funciona como gerador, convertendo a energia cinética do veículo em energia elétrica, assim carregando o banco de baterias. O Híbrido BR não requer carga externa das baterias.

O esquema com a arquitetura do Híbrido BR é apresentada na Figura 13. Trata-se de um veículo híbrido do tipo série com arquitetura similar a apresentada no Tópico 1.2.1. Em azul está o motor mecânico e o gerador, em laranja há o banco de baterias e de acordo com o modo de funcionamento do veículo o motor pode carregar as baterias ou fornecer carga para acelerar o motor, os modos de operação do veículo híbrido do tipo série também estão detalhados no Tópico 1.2.1.

Em relação à partida do Híbrido BR ele apresenta duas possibilidades: partida utilizando apenas as baterias ou partida utilizando apenas o motor diesel, ou seja, a partir do gerador. Estes modos de operação de partida estão apresentados na Figura 14.

Pode-se notar pela Figura 14 que quando o Híbrido BR realiza a partida na bateria, o motor mecânico só começa a atuar quando o veículo atinge 15 km/h, ou seja, caso o veículo demore muito tempo para atingir esta velocidade o banco de baterias pode chegar a uma alta profundidade de descarga ou até descarregar totalmente as baterias. Já para o caso da partida com o motor mecânico o desgaste do banco de baterias é bem inferior, e quando o veículo está parado é possível que o motor mecânico carregue as baterias.

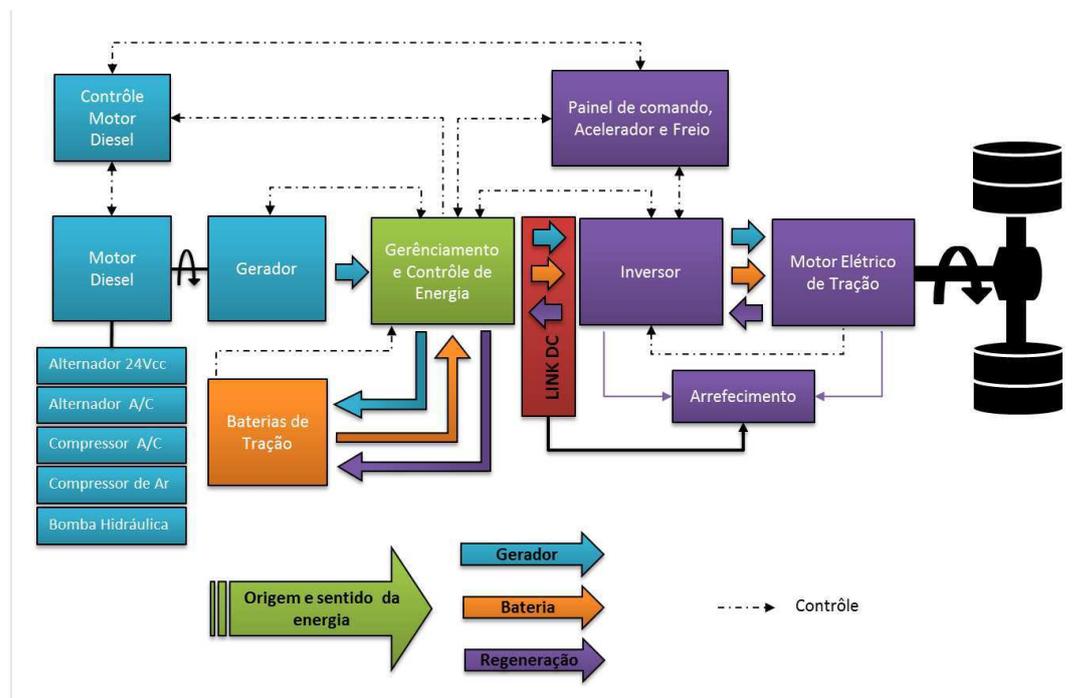


Figura 13 - Arquitetura do Híbrido BR.

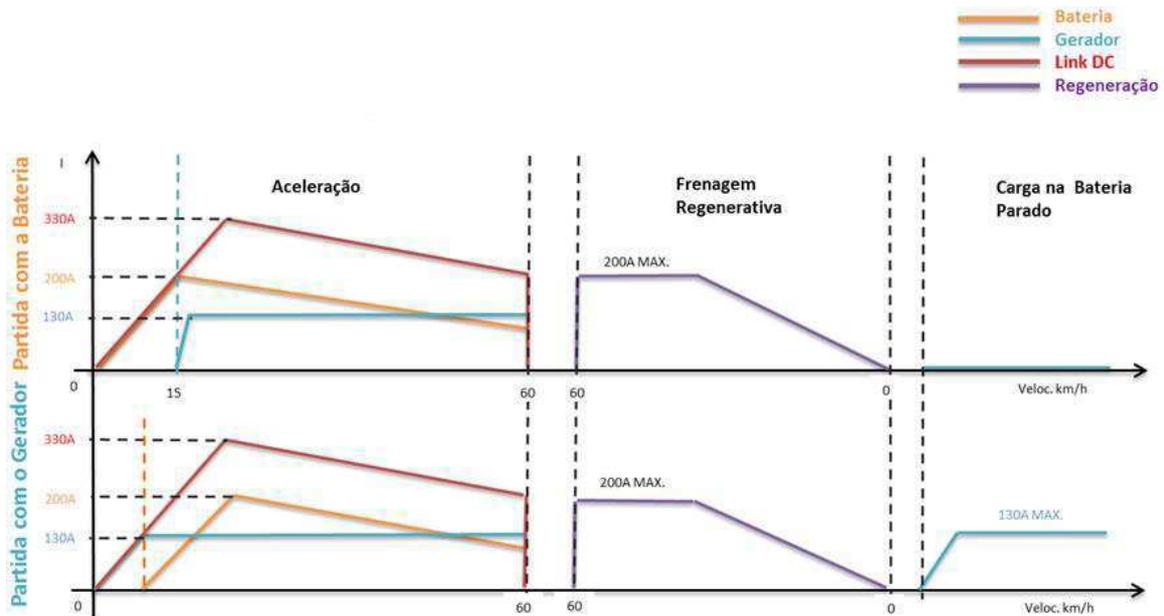


Figura 14 - Partida com a bateria ou gerador.

Para testar o desempenho deste veículo foram instalados equipamentos *data logger* que são equipamentos que medem corrente e tensão a cada determinado tempo (pré-definido). Além disto, foram colocados galões de água para que simulassem o peso dos passageiros. E todos os equipamentos de uso padrão foram mantidos em funcionamento usual, como: rádio, ar condicionado, faróis, etc.

Durante os testes o Híbrido BR estava com a seguinte parametrização: o veículo sai da inércia e atinja 10 km/h somente na bateria, ao atingir essa velocidade entra o grupo gerador (motor diesel) trabalhando em série com o banco de baterias. Caso o banco de bateria atinja uma tensão de 534 Volts, ou seja, 11,12 Volts por bateria é atuada uma condição chamada de sub-tensão onde o grupo gerador atua independente da velocidade isso ocorre para repor a carga da bateria, e sai dessa condição quando o banco de bateria atingir uma corrente de carga de 60 A.

Foram feito a medição em dois ônibus que realizaram suas rotas padrões, efetuando-se as paradas de acordo com cada rota. Os resultados obtidos para as tensões e correntes para as rotas 1 e 2 estão apresentados nas Figura 15, Figura 16, Figura 17 e Figura 18.

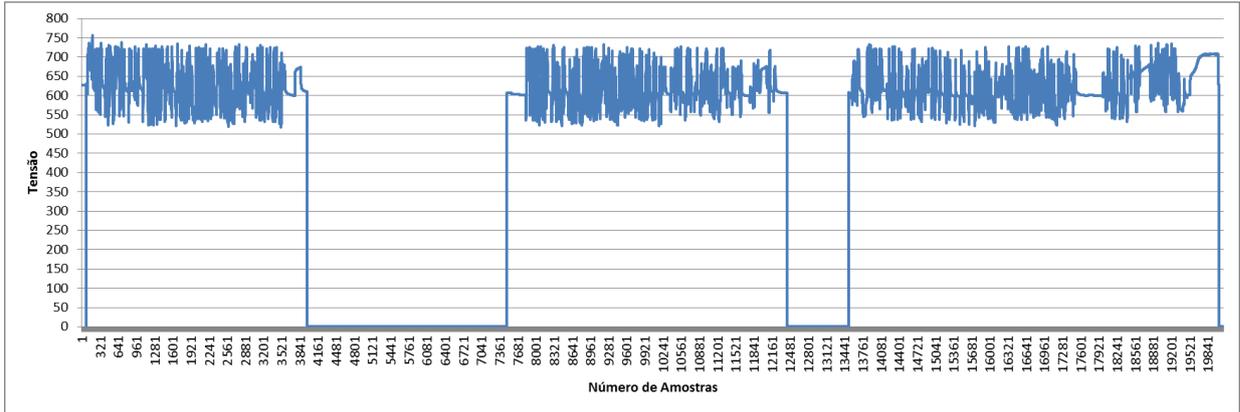


Figura 15 - Gráfico da Tensão (Rota 1).

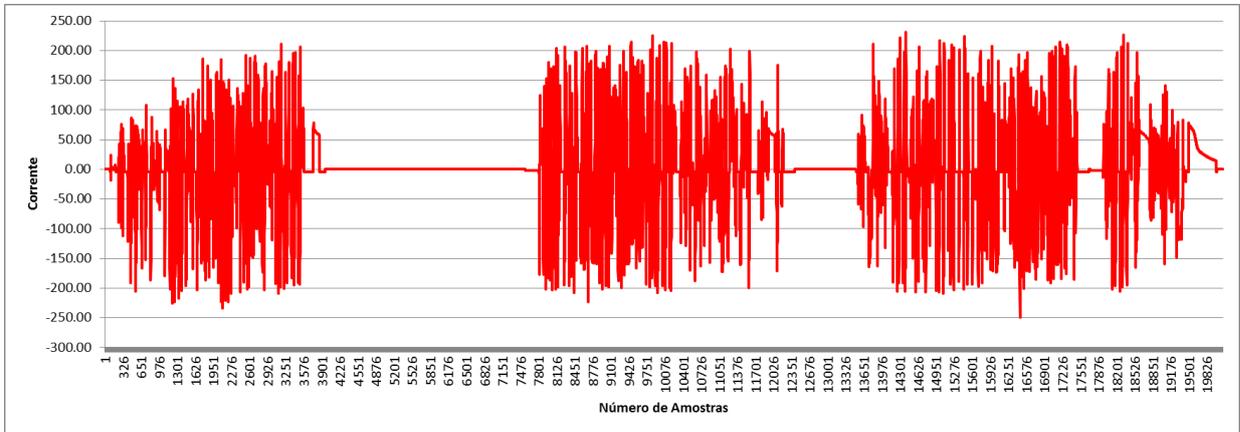


Figura 16 - Gráfico da Corrente (Rota 1).

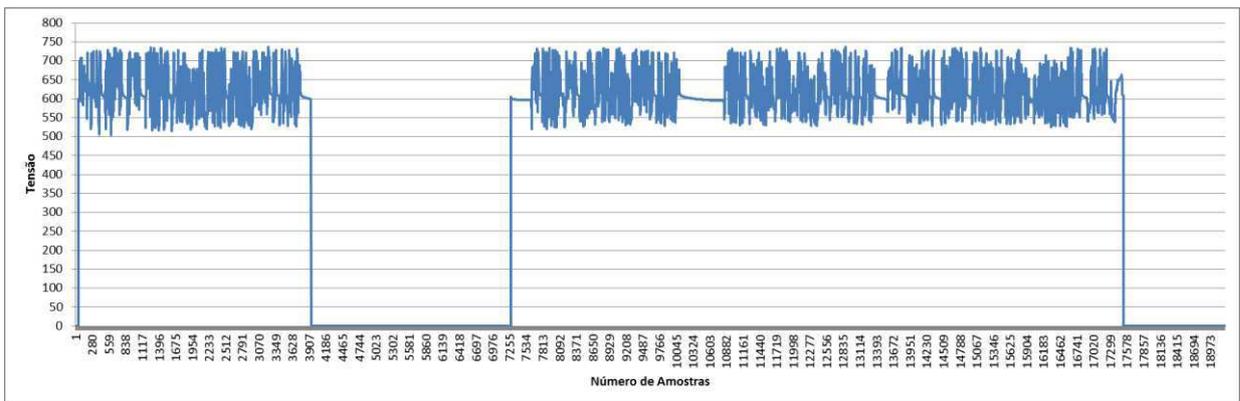


Figura 17 - Gráfico da Tensão (Rota 2).

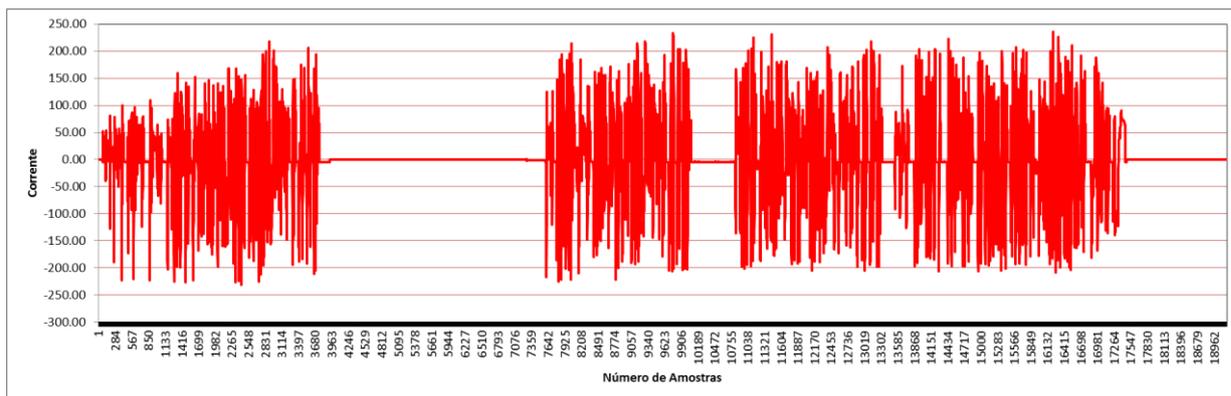


Figura 18 - Gráfico da Corrente (Rota 2).

Para a análise desses dados, dividiu-se a rota 1 em três trechos, trechos os quais a corrente é diferente de zero, para a rota 2 foi necessário dividir em dois trechos. Os resultados com os valores de tensão corrente e o balanço energético estão apresentados nas Tabela 6, Tabela 7, Tabela 8 e Tabela 9.

Tabela 6 - Análise dos resultados dos trechos da rota 1.

Trecho 1	Tensão Máxima	757.00 V	Corrente Máxima	210.67 A
	Tensão Mínima	518.00 V	Corrente Mínima	-234.00 A
	Tensão Média	626.02 V	Corrente Média	-4.40 A
	Tensão Máxima por bateria	15.77 V	Corrente de Carga Média	56.32 A
	Tensão Mínima por Bateria	10.79 V	Corrente de Descarga Média	-44.50 A
	Tensão Média por Bateria	13.04 V	Balanço Trecho 1	-4.737 Ah
Trecho 2	Tensão Máxima	733.00 V	Corrente Máxima	225.33 A
	Tensão Mínima	521.00 V	Corrente Mínima	-222.67 A
	Tensão Média	613.75 V	Corrente Média	0.11 A
	Tensão Máxima por bateria	15.27 V	Corrente de Carga Média	78.14 A
	Tensão Mínima por Bateria	10.85 V	Corrente de Descarga Média	-41.51 A
	Tensão Média por Bateria	12.79 V	Balanço Trecho 2	0.150 Ah
Trecho 3	Tensão Máxima	736.00 V	Corrente Máxima	231.67 A
	Tensão Mínima	521.00 V	Corrente Mínima	-249.00 A
	Tensão Média	621.42 V	Corrente Média	2.56 A
	Tensão Máxima por bateria	15.33 V	Corrente de Carga Média	66.28 A
	Tensão Mínima por Bateria	10.85 V	Corrente de Descarga Média	-39.38 A
	Tensão Média por Bateria	12.95 V	Balanço Trecho 3	4.612 Ah

Tabela 7 - Análise dos resultados gerais rota 1.

Total	Tensão Máxima	757.00 V	Corrente Máxima	231.67 A
	Tensão Mínima	518.00 V	Corrente Mínima	-249.00 A
	Tensão Média	620.14 V	Corrente Média	0.01 A
	Tensão Máxima por bateria	15.77 V	Corrente de Carga Média	67.09 A
	Tensão Mínima por Bateria	10.79 V	Corrente de Descarga Média	-41.37 A
	Tensão Média por Bateria	12.92 V	Balanço TOTAL	0.026 Ah

Tabela 8 - Análise dos resultados dos trechos da rota 2.

Trecho 1	Tensão Máxima	736.70 V	Corrente Máxima	217.67 A
	Tensão Mínima	504.70 V	Corrente Mínima	-231.00 A
	Tensão Média	624.22 V	Corrente Média	-0.68 A
	Tensão Máxima por bateria	15.35 V	Corrente de Carga Média	58.76 A
	Tensão Mínima por Bateria	10.51 V	Corrente de Descarga Média	-41.82 A
	Tensão Média por Bateria	13.00 V	Balanco Trecho 1	-0.733 Ah
Trecho 2	Tensão Máxima	736.80 V	Corrente Máxima	235.33 A
	Tensão Mínima	520.40 V	Corrente Mínima	-224.67 A
	Tensão Média	614.54 V	Corrente Média	-0.08 A
	Tensão Máxima por bateria	15.35 V	Corrente de Carga Média	76.27 A
	Tensão Mínima por Bateria	10.84 V	Corrente de Descarga Média	-41.56 A
	Tensão Média por Bateria	12.80 V	Balanco Trecho 2	-0.231 Ah

Tabela 9 - Análise dos resultados gerais rota 2.

Total	Tensão Máxima	736.80 V	Corrente Máxima	235.33 A
	Tensão Mínima	504.70 V	Corrente Mínima	-231.00 A
	Tensão Média	617.20 V	Corrente Média	-0.25 A
	Tensão Máxima por bateria	15.35 V	Corrente de Carga Média	70.92 A
	Tensão Mínima por Bateria	10.51 V	Corrente de Descarga Média	-41.63 A
	Tensão Média por Bateria	12.86 V	Balanco TOTAL	-0.964 Ah

Os valores do balanço energético total para as duas rotas 1 e 2 foram de, respectivamente, 0,026Ah e -0,964Ah. Isto representa que no primeiro caso a bateria ganhou carga após o término da rota e no segundo caso ela perdeu carga. Tais valores são considerados satisfatórios, pois a ciclagem da bateria é um processo estocástico, caso o ônibus efetue muitas paradas a recarga das baterias através do freio regenerativo é maior, aumentando assim o valor do balanço energético e o número dessas paradas possuem como variáveis: o trânsito, o horário de circulação do ônibus, o número de paradas nos pontos e o modo de dirigir do motorista. O valor negativo do balanço energético representa 1,54% da capacidade da bateria (12ML65 possui uma capacidade de 65Ah), logo os resultados foram considerados excelentes.

Além dos testes em campo, é Julho deste ano (2014) a norma europeia EN 50342-6 foi lançada a proposta dela é validar as baterias chumbo-ácido para aplicações em VEH. Esta norma é composta de testes padrões como reserva de capacidade, descarga a frio, durabilidade e consumo de água, de inovador há o teste de ciclagem *micro-hybrid test* que é um teste que simula o funcionamento de um veículo com as características de um veículo híbrido com freio regenerativo. No momento há cinco baterias em teste realizando os testes desta norma que têm previsão para terminarem entre março e abril de 2015. Caso as baterias passem no teste, elas poderão ser certificadas para a aplicação em VEH.

3 Conclusões

Neste Trabalho de Conclusão de Curso, foram apresentados conceitos básicos dos veículos elétricos e dos veículos elétricos híbridos, assim como, um estudo do mercado de dos veículos híbridos e das possíveis tecnologias de baterias. Estes conceitos serviram de base para o desenvolvimento e entendimento do projeto do Híbrido BR.

O projeto do Híbrido BR mostrou-se adequado visto os resultados obtidos em campo, e há a expectativa de que passe por novos testes para futuramente ser lançado no mercado.

4 Bibliografia

ANDERMAN, Menahem. Assessing the Future of Hybrid and Electric Vehicles: The xEV Industry Insider Report. 2014.

ANFAVEA - ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS FABRICANTES DE VEÍCULOS AUTOMOTORES. Anuário da Indústria Automobilística Brasileira. São Paulo, 2014. Disponível em: <<http://www.anfavea.com.br>>. Acesso em: 07/11/2014.

AOGHS – AMERICAN OIL & GAS HISTORICAL SOCIETY. Cantankerous Combustion – 1st U.S. Auto Show. 2015. Disponível em: < <http://aoghs.org/editors-picks/first-auto-show/> >. Acesso em: 08/01/2015.

Baterias Chumbo-Ácido. Engenharia de Produto - Grupo Moura. 2013.

BRAZIL AUTOMOTIVE GUIDE. Guia Setorial da Industria Automotiva Brasileira. Disponível em: <<http://www.anfavea.com.br/automotiveguide/BAG2014.zip>>. Acesso em: 07/11/2014.

BENCHENTRIT, D. Valeo Powertrain Forecast. Bamberg, Germany, May 2014.

CARTA DA ANFAVEA. Publicação Mensal da Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores. Janeiro, 2015. Disponível em: <<http://www.anfavea.com.br/cartas/carta341.pdf>>. Acesso em: 01/15/2014.

Catálogos MOURA. 2014. Disponível em: <<http://www.moura.com.br/pt/produtos>>. Acesso em: 12 dez. 2014.

DINIZ, Flamarion B. Acumuladores de Chumbo-Ácido: Fabricação e Novos Desenvolvimentos. 1995.

EHSANI, M., GAO, Y., EMADI, A. Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, Theory, and Design, Second Edition. 2010.

EHSANI, M., GAO, Y., MILLER, J. M. Hybrid electric vehicles: Architecture and motor drives. Proceedings of the IEEE, Special issue on Electric, Hybrid Electric and Fuel Cells Vehicle, Vol. 95, No. 4, April 2007.

EIA - United States Energy Information Administration, 2010.

Evolução da Moura. 2014. Disponível em: <[www.moura.com.br /pt/evolucao](http://www.moura.com.br/pt/evolucao)>. Acesso em: 12 dez. 2014.

GAO., T. EHSANI, M. An investigation of battery technologies for the Army's hybrid vehicle application, in Proceedings of the IEEE 56th Vehicular Technology Conference, Vancouver, British Columbia, Canada, September 2002.

HEALEY, J. R. Porsche's first car, in 1898, was electric. USA Today (Tysons Corner, Virginia: Gannett Company, Inc.). 2014.

HUSAIN, I. Electric and Hybrid Vehicle, Design Fundamentals. 2005.

MI, C., MASRUR, M. A., GAO, D. W. Hybrid Electric Vehicles: Principles and Applications with Practical Perspectives. 2011.

MONAHOV, Boris. Lead-Carbon Batteries - the Right Choice for Hybrid Electric Vehicles. Brazil, July 2014.

TECSOC - The Center for the Study of Technology and Science. Today in Technology History: July 6. 2009.

WAKEFIELD, E. H. History of the Electric Automobile: Battery-only Powered Cars, Society of Automotive Engineers (SAE), Warrendale, PA, 1994.