

Design and Simulation of an Energy Storage System with Batteries Lead Acid and Lithium-Ion for an Electric Vehicle: Battery vs. Conduction Cycle Efficiency Analysis

G. Santos, F. Grandinetti, R. Alves, and W. Lamas

Abstract—This work aimed to study and analyze the model of a conventional vehicle transformed into an electric vehicle self-sustaining, in this transformation process, the proposal was to simulate two proposals of energy storage system, being a bank with lead-acid batteries (Pb) and another bank with lithium-ion (Li-ion) batteries, considering three transmission options with different gear ratios. In this work, the MATLAB and ADVISOR software were used for modeling and simulation. Simulations were carried out using three driving cycles that represent the conditions of running in: a highway, a highway with an ascent of mountain and city, all conditions being based on routes in the Vale do Paraíba Paulista region. At the end of the proposed simulation models, a comparison was made between the proposed energy storage system models considering gear ratio and driving cycles based on electric vehicle model under development.

Index Terms—Batteries, Computer simulation, Electric vehicles, Energy storage, MATLAB.

I. INTRODUÇÃO

AO longo dos últimos anos, os veículos elétricos (VEs) vêm se tornando cada vez mais importantes na sociedade. Essa importância se dá, principalmente, por questões ambientais que têm sido abordadas cada vez com maior veemência. O aquecimento global vem sendo amplamente discutido em todo mundo, em vários encontros e fóruns mundiais da Organização das Nações Unidas (ONU) e outras organizações de defesa ambiental [1]. O Acordo de Paris, onde 195 países são signatários, destaca que o aquecimento causado com a liberação de dióxido de carbono quando os combustíveis fósseis são queimados podem desencadear um aquecimento do planeta de até 2°C até 2050 [2].

Além das questões ambientais, é preciso considerar que as reservas de petróleo deverão durar por mais cerca de 40 anos. Assim, a escassez será inevitável e poderá resultar em utilização de outros combustíveis fósseis que podem não ser economicamente viáveis. Dessa forma, pode-se ter um colapso no abastecimento da frota brasileira [3].

G. S. Santos, Engbras Software e Projetos, Barueri, São Paulo, Brasil, gustavosoarez@gmail.com.

F. J. Grandinetti, Universidade de Taubaté, Taubaté, São Paulo, Brasil, fgrandinetti@hotmail.com.

R. A. R. Alves, Universidade de Taubaté, Taubaté, São Paulo, Brasil, rodrigo.rocha.alves@hotmail.com.

W. Q. Lamas, Universidade de São Paulo, Lorena, São Paulo, Brasil, lamaswq@gmail.com.

Corresponding author: Gustavo Soares dos Santos.

Os veículos elétricos têm emissões de poluentes bem reduzidas, ou até zero, no caso dos veículos puramente elétricos. Esses veículos utilizam motores elétricos que por sua vez podem ser alimentados por baterias recarregáveis e ultracapacitores, que transformam a energia química armazenada nas baterias e nos ultracapacitores em energia elétrica, possibilitando o funcionamento do motor, que por sua vez converte em energia mecânica entregando essa energia de forma direta nas rodas ou através de uma transmissão, possibilitando que o veículo se locomova [4].

Uma análise técnica dos motores e uma metodologia para sua seleção, destacando a avaliação de parâmetros e a seleção do melhor modelo a partir do mapeamento do rendimento das máquinas foram realizados [5].

Também há uma preocupação com o gerenciamento da recarga desses veículos, principalmente com aqueles comercialmente disponíveis, que são eventualmente recarregados na rede elétrica, [6], [7] ou no circuito de distribuição residencial [8].

Este trabalho consiste na apresentação do sistema de armazenamento de energia como um componente fundamental na arquitetura de um VE, além de apresentar que o tipo de armazenador de energia adotado em uma configuração de veículo está diretamente relacionado à rota de que o veículo será submetido: Cidade, Auto estrada ou a combinação de ambos.

Para a escolha da melhor configuração a ser adotada, neste trabalho foram: Elaboradas e simuladas arquiteturas veiculares utilizando os softwares Matlab e ADVISOR, considerando a aplicação em rotas similares a condições encontradas na região do Vale do Paraíba Paulista. Esses modelos consideram um tipo de armazenador de energia e transmissão diferentes para cada proposta de aplicação do veículo. Ao final do trabalho, espera-se ter informações sobre qual o melhor sistema de armazenamento de energia para ser aplicado ao protótipo de VE.

II. MATERIAIS E MÉTODOS

A. Modelagem das Propostas de Bancos de Bateria

Os modelos propostos neste trabalho são baseados em baterias com características de baterias chumbo ácido (Pb) e baterias de lítio-íon (Li-ion), a criação dos modelos tem como objetivo prever o desempenho de cada uma das opções propostas, considerando as variáveis: máquina elétrica adotada no projeto do veículo, tipo de veículo e ciclo de rodagem adotado como referência.

Os modelos propostos neste trabalho foram baseados no circuito equivalente apresentado na Figura 1, no circuito equivalente, temos os seguintes componentes: E é a tensão

de circuito aberto, R é a resistência interna, I é a corrente e V é a tensão de alimentação. Este circuito apresenta valores de E e R não constantes.

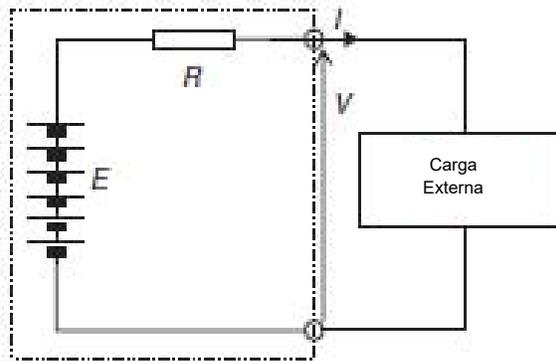


Fig. 1. Circuito equivalente para modelagem de baterias.

A tensão e corrente no circuito aberto são diferentes para cada um dos dois tipos de baterias propostos; a resistência interna para baterias chumbo ácido (Pb) é considerada constante e para as baterias lítio-íon (Li-ion) tem variação.

A temperatura de trabalho para cada um dos tipos de baterias é diferente, baterias chumbo ácido (Pb) tem uma temperatura de operação de aproximadamente 30° [12] e as baterias de lítio-íon (Li-ion) tem temperatura de operação variando entre 20° e 40° para uma capacidade de operação de 100° [13].

B. Ciclos de Condução

Ciclo de condução é uma sequência de condições de operação (marcha lenta, aceleração, desaceleração, distância, tempo de condução, frequência das partidas e paradas) desenvolvida para representar um padrão típico de condução em uma determinada região, se aproximando da realidade, sendo amplamente utilizado em estudos de emissões veiculares [9].

O ciclo Cleveland é considerado um ciclo de condução real, por ser baseado na aquisição de dados realizada em uma rodovia que apresenta velocidade média de 93,14 km/h e velocidade máxima de 161,63 km/h, temperatura ambiente de 20 °C e nenhuma elevação de pista.

O ciclo VAIL2NREAL é um ciclo de condução real desenvolvido após a aquisição de dados realizada em uma viagem com subida de serra, com elevação de altitude de aproximadamente 700 m a partir do seu ponto de partida. Esse ciclo de apresenta velocidade média de 84,7 km/h e máxima de 121,7 km/h.

No Brasil, o ciclo de condução adotado para determinação dos níveis de emissões de CO₂ em veículos leves e comerciais leves é o ciclo americano conhecido como FTP-75 (*Federal Test Procedure 75*). Os procedimentos relativos a esse ensaio são descritos na norma brasileira NBR 6601 [10].

C. Simulação Computacional dos Modelos Propostos

O ADVISOR (*Advanced Vehicle Simulator*) é um *software* de simulação de veículos que possibilita simulações de diversas arquiteturas veiculares. Entre as possibilidades de simulação estão: veículos elétricos (VE), veículos elétricos híbridos (VEH) e VEH com células a combustível (H₂). Esse *software* foi desenvolvido pelo *National Renewable Energy Laboratory* (NREL), dos Estados Unidos. Foi projetado para ser uma ferramenta de

análise para auxiliar o *Department of Energy* (DOE), dos Estados Unidos, no desenvolvimento de tecnologias para VE e VEH em conjunto com as principais montadoras norte-americanas: Ford, General Motors e Daimler Chrysler. O principal objetivo do ADVISOR é possibilitar a comparação entre os modelos simulados, proporcionando análises dos seus componentes e o seu impacto no desempenho e consumo de combustível [11].

O ADVISOR foi criado no ambiente MATLAB/Simulink, por se ter um ambiente de programação baseado em matrizes, o que torna possível a realização de cálculos sem muita complexidade, assim como a representação de sistemas complexos na forma gráfica.

III. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A. Simulação de Veículo Convencional

A proposta foi simular o funcionamento do veículo convencional utilizado como base para o desenvolvimento da pesquisa e após a simulação ter informações sobre o comportamento do veículo durante um determinado ciclo de condução, além de dados sobre emissão de poluentes na atmosfera. A Tabela I apresenta os dados de entrada adotados para a simulação do veículo convencional utilizado.

TABELA I
PRINCIPAIS DADOS DO MOTOR INSERIDOS NO ADVISOR

Combustível	Gasolina (E-22)
Potência	76 cv a 5.600 rpm
Torque	13,3 kgfm a 3.200 rpm

Para realizar a simulação no *software* ADVISOR, foram adicionadas características necessárias no diagrama de blocos ou diretamente na tela de entrada de dados.

O modelo do veículo foi representado graficamente usando os diagramas de blocos do Simulink, o que permitiu a definição das conexões entre os componentes de forma intuitiva. A figura 2 apresenta o diagrama de blocos do modelo de veículo convencional a combustão.

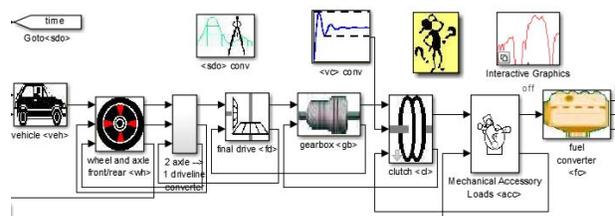


Fig. 2. Tela do software Simulink com diagrama de blocos do modelo de veículo convencional.

A Figura 3 apresenta a tela de entrada do ADVISOR, onde o modelo do veículo convencional utilizado como base para a simulação é representado. Para simular um modelo próximo ao veículo protótipo, alguns campos são alterados na tela de entrada em função das características específicas do mesmo.

Para a simulação, foi necessária a escolha dos procedimentos de testes e, em seguida, o ADVISOR realizou a simulação e disponibilizou os resultados. A Figura 4 apresenta os resultados em forma de gráficos para alguns parâmetros previamente escolhidos.

Os parâmetros escolhidos na simulação do modelo foram:

- km/h – Velocidade durante o ciclo de condução simulado;

- $fc_trq_out_a$ – Torque do motor de combustão interna (MCI) alcançado durante o ciclo de condução. No gráfico o torque está alinhado com a velocidade [N.m];
- emissions – Níveis de emissão de HC, CO, NO_x e PM;

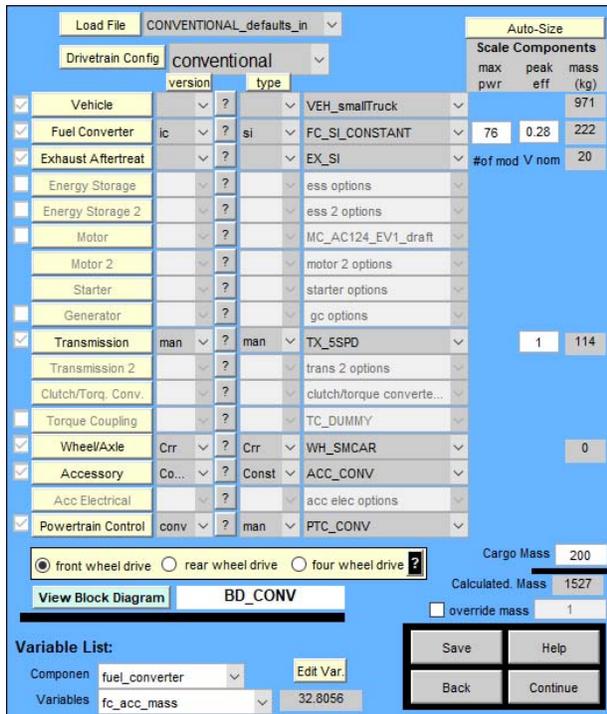


Fig. 3. Tela de entrada dos dados para a simulação de veículo convencional.

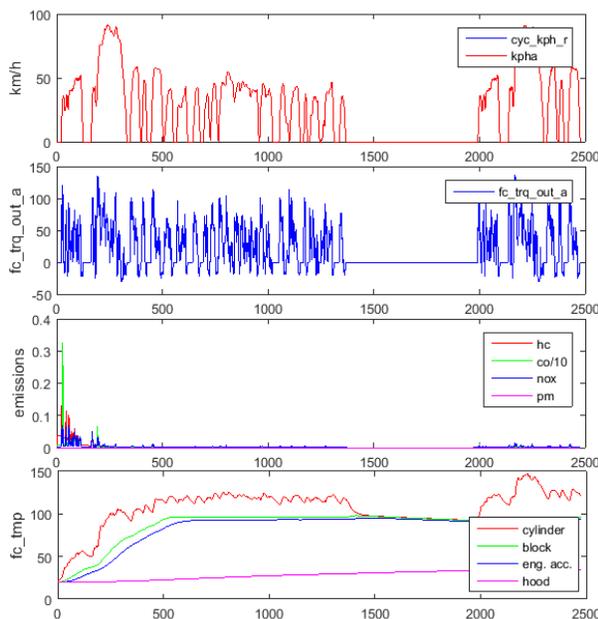


Fig. 4. Resultado simulação veículo convencional.

- temperatura do MCI na linha do tempo – As temperaturas demonstradas são: temperatura do cilindro, temperatura no bloco do MCI, temperatura exterior (agregados do motor – exemplo bomba de água) e a temperatura externa no capô do motor.

A Tabela II apresenta o mapa de eficiência de cada componente do modelo de veículo convencional simulado.

TABELA II
MAPA DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE UM VEÍCULO CONVENCIONAL

Componente	Eficiência [%]
Motor Combustão Interna	22
Embreagem	98
Transmissão	94
Eixo/Rodas	93

Com essas informações foi possível identificar onde ocorreram as maiores perdas e dessa forma foi possível propor modificações com o objetivo de melhorar a eficiência do veículo. Na simulação do veículo convencional utilizado neste trabalho, a eficiência do MCI foi de 22 %.

B. Simulação dos Modelos Propostos

1) Ciclos de condução no software ADVISOR

Para a simulação dos modelos propostos, foram utilizados para o teste de consumo de energia três ciclos de condução, sendo um ciclo norte-americano (FTP-75) e dois ciclos construídos a partir de dados coletados em condições reais de rodagem em estradas norte-americanas. A partir dos três ciclos escolhidos, foi estabelecida uma relação entre esses ciclos e rotas pré-definidas na região do Vale do Paraíba, estado de São Paulo, Brasil.

A rota São José dos Campos-Caçapava foi baseada no ciclo de condução Cleveland por apresentar características similares à rota na rodovia estadual Gov. Carvalho Pinto, que possui excelentes condições de rodagem, permitindo desenvolver velocidades máximas acima de 100 km/h.

A rota Tremembé-Capivari foi baseada no ciclo de condução VAIL2NREL, que fora desenvolvido para um trecho de subida de serra, com elevação de altitude de cerca de 700 m, a partir do seu ponto inicial. Esse ciclo de condução apresenta velocidade média de 84,7 km/h e máxima de 121,7 km/h.

O ciclo VAIL2NREL pode ser relacionado com a rota utilizando a Rod. Floriano Rodrigues Pinheiro, que possui boas condições de conservação. A cidade de Capivari encontra-se a aproximadamente a 1.800 m acima do nível do mar.

A rota Taubaté-Tremembé foi baseada no ciclo de condução FTP-75, que é um ciclo com característica urbana. Ele possui velocidade média de 31,5 km/h, velocidade máxima de 91,2 km/h e diversas paradas ao longo do percurso. Conforme essas características urbanas atribuídas a esse ciclo, foi possível relacioná-lo com a rota urbana entre as cidades de Taubaté e Tremembé.

2) Simulação modelo de banco baterias chumbo ácido (Pb)

Para realizar a simulação do modelo de banco com baterias chumbo ácido (Pb) proposto para o VE no software ADVISOR, a figura 5 apresenta a tela de entrada onde foram adicionadas características específicas do veículo com banco de baterias chumbo ácido (Pb). A arquitetura veicular considerada é apresentada na Tabela III

TABELA III
DADOS INSERIDOS NO SOFTWARE ADVISOR

Tipo de veículo	Veículo de carga - dois passageiros (similar a uma VW Saveiro)
Máquina elétrica	Motor de indução Westinghouse – 19 kW ~ 25 cv
Transmissão	Manual de cinco velocidades
Accessórios	700 W – considerado para cargas elétricas necessárias para o veículo

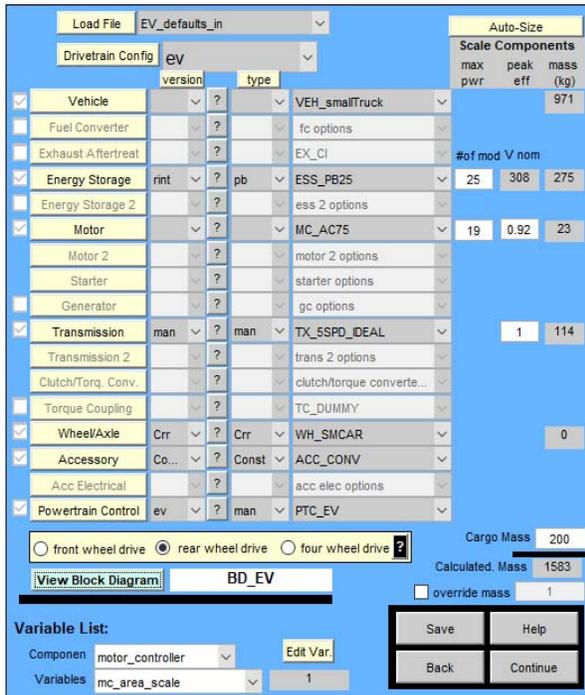


Fig. 5. Tela de dados de entrada para veículo puramente elétrico.

Para realização da simulação, foram consideradas três opções de transmissões:

- Transmissão mecânica de cinco velocidades (utilizando todas as relações);
- Transmissão de cinco velocidades (utilizando apenas 1ª marcha, com relação 2,61, com redução de 3,82);
- Transmissão de cinco velocidades (utilizando apenas 2ª marcha, com relação de 1,94, com redução de 3,82).

O modelo de VE com banco de bateria chumbo ácido (Pb) foi modelado no Simulink e o diagrama de blocos é apresentado na figura 6.

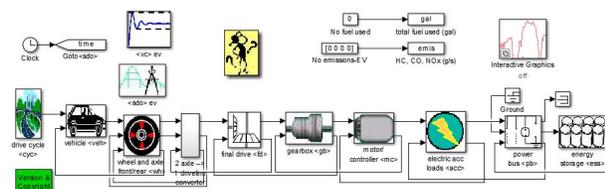


Fig. 6. Diagrama de blocos modelo VE bateria chumbo ácido (Pb).

O modelo de bateria chumbo ácido (Pb) adotado foi simulado no software ADVISOR considerando os dados apresentados na Tabela IV.

TABELA IV
CARACTERÍSTICAS BANCO DE BATERIAS CHUMBO ÁCIDO (Pb)

Marca	Hawker Genesis
Tensão	12V
Capacidade	26A
Peso	10,1 Kg
Quantidade de Módulos	25

Nesta arquitetura, com o objetivo de aproximar o modelo de veículo simulado ao protótipo em desenvolvimento, foram modificados alguns parâmetros originalmente propostos no software ADVISOR. O primeiro parâmetro

modificado foi o modelo de máquina elétrica utilizada (motor). Originalmente a máquina Westinghouse é modelada com 75 kW, contudo, para essa simulação, esse parâmetro foi modificado para 19 kW, aproximando-se da potência utilizada da máquina WEG, que foi adotada fisicamente; o segundo parâmetro modificado foi o modelo do diâmetro de roda e do pneu (Wheel/Axle), sendo adicionada a medida 185/70R14 para esse parâmetro. Na simulação desse modelo foi utilizado o procedimento de teste FTP-75, com temperatura ambiente de 20 °C. Após a inclusão desses dados no software, a simulação foi realizada e os resultados obtidos são apresentados na Figura 7.

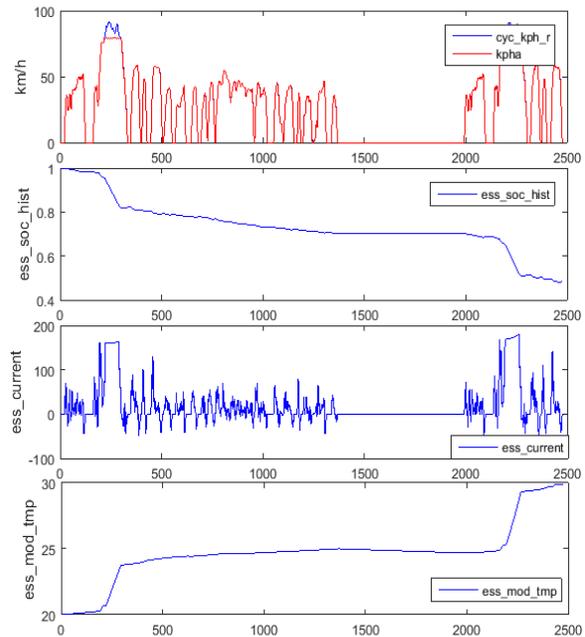


Fig. 7. Resultados para banco de baterias chumbo ácido (Pb) no ciclo FTP-75.

Os resultados apresentados na Figura 3 são referentes aos seguintes parâmetros:

- km/h – Apresenta a velocidade do veículo solicitada durante o ciclo de condução simulado (cyc_kph_r) e a velocidade alcançada com a configuração escolhida;
- ess_soc_hist – Apresenta o histórico do estado de carga da bateria;
- ess_current – Corrente disponibilizada pelo banco de baterias em cada momento do ciclo de condução [A];
- ess_mod_tmp – Temperatura do banco de baterias durante o ciclo de condução [°C].

A Tabela V apresenta o mapa de distribuição de energia da arquitetura simulada. Com a análise das informações foi possível verificar que a eficiência da máquina elétrica foi de 82 % e do banco de baterias chumbo ácido foi de 77 %.

TABELA V
MAPA DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA PARA O VE COM BANCO DE BATERIAS CHUMBO ÁCIDO (PB)

Componente	Eficiência [%]
Armazenador de energia (banco de baterias)	77
Motor elétrico	82
Relação final da transmissão	100
Transmissão	100
Eixo/Rodas	95

Na Tabela VI é apresentado o mapa de eficiência energética para os modelos simulados na rota entre as cidades de São José dos Campos e Caçapava, com ciclo de condução Cleveland.

TABELA VI
EFICIÊNCIA ENERGÉTICA (PB) NA ROTA SÃO JOSÉ DOS CAMPOS X
CAÇAPAVA – CLEVELAND

	Cinco marchas	Apenas 1ª marcha	Apenas 2ª marcha
Banco de baterias	67 %	67 %	66 %
Máquina elétrica	80 %	85 %	90 %
Transmissão	95 %	96 %	96 %

A Tabela VII apresenta o mapa de eficiência energética para os modelos simulados na rota de subida de serra entre as cidades de Tremembé e Capivari, com ciclo de condução VAIL2NREL.

TABELA VII
EFICIÊNCIA ENERGÉTICA (PB) NA ROTA TREMEMBÉ X CAPIVARI –
VAIL2NREL

	Cinco marchas	Apenas 1ª marcha	Apenas 2ª marcha
Banco de baterias	72 %	73 %	73 %
Máquina elétrica	84 %	87 %	88 %
Transmissão	95 %	96 %	95 %

A Tabela VIII apresenta o mapa de eficiência energética para os modelos simulados na rota de cidade considerado no perímetro urbano entre as cidades de Taubaté e Tremembé, com ciclo de condução FTP-75.

TABELA VIII
EFICIÊNCIA ENERGÉTICA (Pb) ROTA TAUBATÉ X TREMEMBÉ – FTP-75

	Cinco marchas	Apenas 1ª marcha	Apenas 2ª marcha
Banco de baterias	76 %	79 %	80 %
Máquina elétrica	84 %	86 %	86 %
Transmissão	93 %	96 %	92 %

3) Simulação modelo de banco baterias Lítio-ion (Li-ion)

A Figura 8 apresenta a tela de entrada do ADVISOR para a simulação do modelo com baterias de Lítio-ion (Li-ion), nesta simulação utilizaram-se os mesmos parâmetros do veículo apresentados na Tabela III.

O modelo de bateria lítio-ion (Li-ion) adotado foi simulado no *software* ADVISOR considerando os dados apresentados na Tabela IX.

TABELA IX
CARACTERÍSTICAS BANCO DE BATERIAS LÍLIO-ION (Li-ion)

Marca	Saft Battery
Tensão	3.6V
Capacidade	6A
Quantidade de Módulos	56

Para realização da simulação, foram consideradas as mesmas opções de transmissões utilizadas na simulação do modelo de baterias chumbo ácido (Pb), com a mesma temperatura ambiente de 20 °C.

Após a inclusão dos dados no *software*, a simulação foi realizada e os resultados obtidos são apresentados na Figura 9.

Os resultados apresentados na Figura 8 são referentes aos seguintes parâmetros:

- km/h – Apresenta a velocidade do veículo solicitada durante o ciclo de condução simulado

(cyc_kph_r) e a velocidade alcançada com a configuração escolhida (kpha);

- ess_soc_hist – Apresenta o histórico do estado de carga da bateria;
- ess_current – Corrente disponibilizada pelo banco de baterias em cada momento do ciclo de condução [A];
- ess_mod_tmp – Temperatura do banco de baterias durante o ciclo de condução [°C].

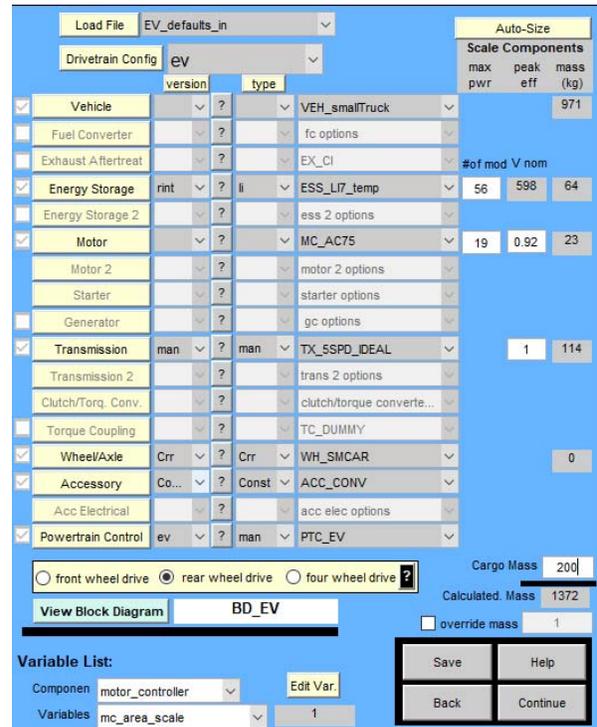


Fig. 8. Tela de dados de entrada para veículo puramente elétrico com banco de baterias de Lítio-ion (Li-ion).

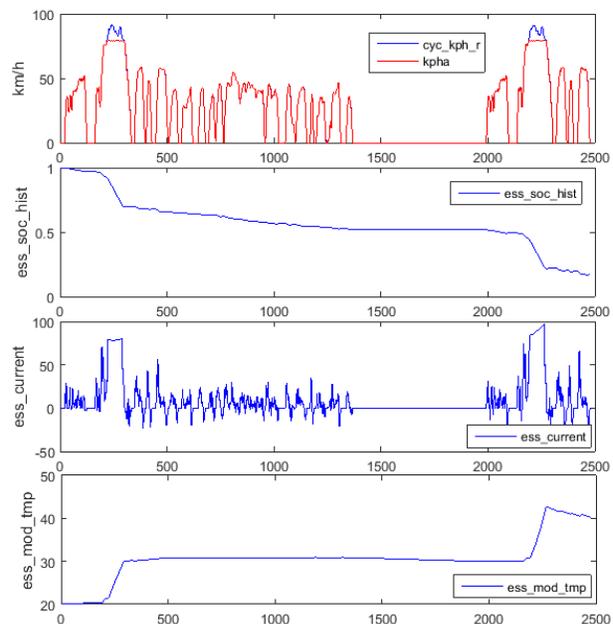


Fig. 9. Resultados para banco de baterias lítio-ion.

A Tabela X apresenta o mapa de eficiência energética considerando a arquitetura simulada. Com a análise das

informações foi possível verificar que a eficiência da máquina elétrica foi de 82 % e do banco de baterias lítio-íon foi de 88 %.

TABELA X
MAPA DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA PARA O VE COM BANCO DE BATERIAS LÍCIO-ÍON (LI-ÍON)

Componente	Eficiência [%]
Armazenador de energia (banco de baterias)	88
Motor elétrico	82
Relação final da transmissão	100
Transmissão	100
Eixo/Rodas	95

Na Tabela XI é apresentado o mapa de eficiência energética para os modelos simulados na rota entre as cidades de São José dos Campos e Caçapava, com ciclo de condução Cleveland, considerando um sistema de armazenamento com baterias de lítio-íon.

TABELA XI
EFICIÊNCIA ENERGÉTICA (LI-ÍON) NA ROTA SÃO JOSÉ DOS CAMPOS X CAÇAPAVA – CLEVELAND

	Cinco marchas	Apenas 1ª marcha	Apenas 2ª marcha
Banco de baterias	86 %	85 %	85 %
Máquina elétrica	79 %	82 %	89 %
Transmissão	95 %	96 %	96 %

A Tabela XII apresenta o mapa de eficiência energética para os modelos simulados na rota de subida de serra entre as cidades de Tremembé e de Capivari, com ciclo de condução VAIL2NREL.

TABELA XII
EFICIÊNCIA ENERGÉTICA (LI-ÍON) NA ROTA TREMEMBÉ X CAPIVARI – VAIL2NREL

	Cinco marchas	Apenas 1ª marcha	Apenas 2ª marcha
Banco de baterias	88 %	88 %	90 %
Máquina elétrica	81 %	82 %	83 %
Transmissão	95 %	96 %	94 %

A Tabela XIII apresenta o mapa de eficiência energética para os modelos simulados considerando a rota de cidade no perímetro urbano entre as cidades de Taubaté e de Tremembé, com ciclo de condução FTP-75.

TABELA XIII
EFICIÊNCIA ENERGÉTICA (LI-ÍON) NA ROTA TAUBATÉ X TREMEMBÉ – FTP-75

	Cinco marchas	Apenas 1ª marcha	Apenas 2ª marcha
Banco de baterias	91 %	93 %	94 %
Máquina elétrica	83 %	86 %	85 %
Transmissão	93 %	96 %	91 %

C. Análise dos Resultados da Simulação

As duas configurações de banco de baterias simuladas neste trabalho apresentam a mesma configuração veicular: motor elétrico, cargas elétricas auxiliares de 700 W e carga considerada de 200 kg. Com esses parâmetros iniciais foram realizadas as simulações considerando os dois cenários de banco de baterias propostos: banco de baterias chumbo ácido e banco de baterias lítio-íon. Cada tipo de bateria tem uma característica de construção e de funcionamento. Essa diferença entre os modelos de baterias propostos fica evidenciada nos resultados encontrados durante as

simulações. Na Tabela XIV é apresentado o comparativo de alguns parâmetros dos modelos simulados.

TABELA XIV
COMPARATIVO DOS PARÂMETROS ENTRE OS MODELOS PROPOSTOS

Tipo de arquitetura simulada	Eficiência do motor [%]	Eficiência do banco de baterias [%]	Peso do veículo [kg]	Peso banco de baterias [kg]
Chumbo ácido (Pb)	82	77	1.583	275
Lítio-íon (Li-ion)	82	88	1.372	64
Veículo convencional	22	-	1.467	-

Analisando a Tabela XIV, foi possível verificar que a eficiência de ambos os bancos é muito próxima, porém o banco com baterias de lítio-íon é mais eficiente, tem o menor peso e a maior eficiência do sistema de armazenamento. Foi possível evidenciar que nas duas aplicações de banco de baterias, nos momentos em que houve necessidade de picos de velocidade acima de 78,5 km/h, o veículo com a arquitetura proposta, não conseguiu atender à solicitação. Outro fator que foi verificado nos gráficos das Figuras 7 e 9, é que os bancos dimensionados têm carga suficiente para atendimento do ciclo de condução especificado e que, conforme a literatura mostra, o banco com baterias de lítio-íon tem temperatura de trabalho muito superior à do banco com baterias de chumbo ácido, o que é normal, pois as faixas de temperatura na operação são diferentes; quando trabalham de forma contínua em temperatura acima do especificado, podem reduzir em cerca de 50% a vida útil do banco de baterias, também é possível verificar que o aumento da temperatura dos bancos de bateria em ambas as configurações está diretamente ligada a velocidade desenvolvida pelo veículo.

Para a corrente de saída apresentada nas figuras 7 e 9, tivemos uma variação de corrente em função de da tensão e corrente no circuito aberto serem diferentes em cada um dos modelos propostos, além disso a resistência interna para banco de baterias chumbo ácido (Pb) é considerada constante e para banco de baterias lítio-íon (Li-ion) tem variação.

Na análise da configuração convencional, foi possível verificar que o desempenho do veículo na simulação foi muito próximo dos dados fornecidos pela montadora do veículo. O veículo nessa configuração apresentou velocidade máxima de 155 km/h, que é muito superior aos 78,5 km/h entregues pelo motor elétrico WEG durante a simulação. Os níveis de emissões (NO_x, HC e CO) apresentados na simulação estão dentro dos padrões estabelecidos na legislação brasileira para esse tipo de veículo, quando considerada a legislação vigente no ano de fabricação do motor utilizado como referência para a simulação. A eficiência do MCI durante o ciclo de condução simulado foi de 22 %.

Os resultados apresentados nas tabelas das simulações apresentam uma eficiência dos bancos de baterias entre 67 e 80 % para o banco com baterias de chumbo ácido e 85 e 96 % para o banco com baterias de lítio-íon, desta forma, o banco com baterias de lítio-íon, de maneira geral, tem uma eficiência superior e tem menor peso que o banco com baterias de chumbo ácido.

A Tabela XV apresenta quais são as configurações que apresentaram o melhor desempenho e autonomia em cada

rota simulada, desta forma, tem-se a recomendação de aplicação em função da utilização do veículo. É possível constatar, analisando a Tabela XV, que o sistema de armazenamento de energia com baterias de chumbo ácido para a rota rodoviária entre as cidades de São José dos Campos e de Caçapava, utilizando o ciclo de condução Cleveland, foi o que apresentou melhores resultados e os sistemas com baterias de lítio-íon apresentaram desempenho superior para as demais rotas.

TABELA XV
MELHOR CONFIGURAÇÃO VEICULAR EM FUNÇÃO DA ROTA DE UTILIZAÇÃO

Rota	Sistema de armazenamento de energia	Tipo de transmissão
São José dos Campos x Caçapava – Cleveland	Chumbo ácido (Pb)	Relação única – 2ª marcha
Tremembé x Capivari – VAIL2NREAL	Lítio-íon (Li-íon)	Relação única – 2ª marcha
Taubaté x Tremembé – FTP-75	Lítio-íon (Li-íon)	Relação única – 1ª marcha

IV. CONCLUSÃO

Com a análise dos dados da simulação foi possível concluir que o sistema de armazenamento com baterias lítio-íon é mais eficiente e proporciona uma autonomia semelhante à opção com baterias de chumbo ácido, porém ocupando um espaço menor e com apenas 23 % do peso do banco com baterias de chumbo ácido.

Considerando que o projeto em desenvolvimento é de um veículo autossustentável e que irá receber, em uma segunda etapa, uma turbina eólica e painéis solares, a preocupação com o peso do sistema de armazenamento de energia é evidente e, quando é considerada a configuração com baterias de lítio-íon, tem-se uma redução de 13 % no peso total do veículo. A região do Vale Paraíba Paulista onde o veículo irá operar, normalmente tem temperatura ambiente superior a 20 °C, e o banco com baterias Lítio-íon é possível a operação em temperatura ambiente superior a 40 °C sem a necessidade de sistema de refrigeração auxiliar.

Contudo, observa-se que a utilização de um sistema de armazenamento de energia com baterias de chumbo ácido é viável, mas quando é considerada o acréscimo de um sistema de micro-geração de energia, a utilização de um banco com baterias de lítio-íon é a mais recomendada.

O comparativo entre os sistemas considerando as duas opções de armazenamento de energia se mostrou satisfatório, pois ele tornou possível sugerir qual a configuração mais viável para uma aplicação específica. Desta forma, é possível considerar que os objetivos específicos propostos no início do trabalho foram atendidos ao longo do seu desenvolvimento.

Os resultados apresentados mostram que, apesar da menor eficiência, o sistema de armazenamento de energia com baterias de chumbo ácido deve ser considerado para uma aplicação em autoestrada sem subida de serra, pois apresenta desempenho ligeiramente superior ao lítio-íon. Para as demais aplicações em autoestrada e urbana o banco com baterias de lítio-íon apresentou desempenho superior.

Por fim, conclui-se que a transformação de um veículo com MCI em um VE utilizando sistema de armazenamento com baterias de lítio-íon é a configuração recomendada para

deslocamentos urbanos diários e para viagens curtas em autoestradas com subidas elevadas, como um trecho de serra. As baterias de chumbo ácido são recomendadas para viagens curtas em autoestradas sem elevação e com característica de alta velocidade, porém não deve ser totalmente descartada para as outras rotas apresentadas neste trabalho, pois como foi possível verificar nas simulações, apresentou bom desempenho, tem fácil aplicação e menor custo por ser uma tecnologia mais conhecida.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao CNPq pela bolsa de Produtividade em Desenvolvimento Tecnológico e Extensão Inovadora (DT), processo nº 312067/2016-0, do Dr. Francisco José Grandinetti e pela bolsa de Produtividade em Pesquisa (PQ), processo nº 300992/2018-1, do Dr. Wendell de Queiróz Lamas.

REFERÊNCIAS

- [1] R. Baran and L. F. L. Legey, "Veículos elétricos: história e perspectivas no Brasil," *BNDDES Setorial*, vol. 33, pp. 207–224, 2011.
- [2] VITAL, Marcos Henrique Figueiredo. Aquecimento global: acordos internacionais, emissões de CO2 e o surgimento dos mercados de carbono no mundo. *BNDDES Setorial*, Rio de Janeiro, v. 24, n. 48, p. [167]-244, set. 2018.
- [3] G. Portilho, "Quanto tempo vai durar o petróleo no mundo?," *Revista Mundo Estranho*, 2017. [Online]. Available: <http://mundoestranho.abril.com.br/ambiente/quanto-tempo-vai-ar-petroleo-no-mundo/>. [Accessed: 20-Aug-2017].
- [4] M. Ehsani, *Modern electric, hybrid electric and fuel cells vehicles: Fundamentals, theory and design*. Boca Raton, FL: CRC Press, 2010.
- [5] F. Aguilera, P. M. de la Barrera, and C. H. De Angelo, "Selection of Induction Machine Models for Efficiency Evaluation in Electric Vehicles," *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 11, no. 1, pp. 334–340, 2013.
- [6] D. F. Silva, T. P. Abud, P. P. Machado, Jr, M. Z. Fortes, R. S. Maciel, and D. H. N. Dias, "Impact Analysis of Plug-in Electric Vehicle Connected in Real Distribution Network," *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 14, no. 5, pp. 2239–2245, 2016.
- [7] W. B. Pereira, L. A. P. Peres, and J. F. M. Pessanha, "Stochastic Model for Simulation of Transformers Supplying the Recharge of Electric Vehicles," *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 15, no. 10, pp. 1908–1916, 2017.
- [8] C. C. Mendoza, A. M. Quintero, F. Santamaria, and J. A. Alarcon, "Methodology to Manage Electric Vehicles Charging in Real-Time," *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 14, no. 2, pp. 782–791, 2016.
- [9] Busatte, Sabrina Yole Bicalho. "Dimensionamento do sistema motor para um veículo elétrico híbrido de configuração em paralelo para uso em ciclo de condução urbana." (2018).
- [10] De Oliveira, Matheus Ferraz. "Análise comparativa de simulação numérica 1D e criação de um conceito veículo elétrico híbrido para redução do consumo de combustível segundo a norma NBR6601 US FTP75." (2019).
- [11] Peng, Xiao, Quan Shuhai, and Xie Changjun. "Simulation of a Li-ion battery/supercapacitor hybrid system for electric vehicle based on secondary development of ADVISOR." 2017 First International Conference on Electronics Instrumentation & Information Systems (EIS). IEEE, 2017.
- [12] Carneiro, Rafael Luiz et al. Essential Aspects of Lead-Acid Batteries and Physical-Chemical and Thermodynamic Principles of its Operation. *Revista Virtual De Quimica*. Niteroi: Brazilian Chemical Soc, v. 9, n. 3, p. 889-911, 2017. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/11449/163361>>.
- [13] Bufalo, Luis Alfredo; Gonelli, Gabriel Morales; Baumgartner, Luis F.; "Gerenciamento térmico da bateria em veículos elétricos: o sistema líquido combinado", p. 435-447. In: São Paulo: Blucher, 2017. ISSN 2357-7592, DOI 10.5151/engpro-simeca2017-33.



Gustavo Soares dos Santos possui graduação em engenharia elétrica (2008) pela USS, especialização em gerenciamento de projetos (2012) pelo UniFOA e mestrado em engenharia mecânica (2017) pela UNITAU. Possui experiência em planejamento e montagem de veículos protótipos da engenharia experimental na MAN *Latin America* / Volkswagen Caminhões e Ônibus, gestão de equipes na área de gerenciamento de peças protótipo e análise de DMU (*Digital Mock Up*) de veículos protótipos.



Francisco José Grandinetti possui graduação em engenharia mecânica (1988) pela UFU, mestrado em engenharia aeronáutica e mecânica pelo ITA (1992) e doutorado em engenharia aeronáutica e mecânica pelo ITA (1998). Possui experiência nas áreas de mecatrônica, dinâmica dos corpos rígidos, elásticos e plásticos, atuando principalmente nos seguintes temas: robótica, automação e controle industrial, pneumática, vibrações mecânicas, e desenvolvimento de protótipos de sistemas eletromecânicos.



Rodrigo Augusto Rocha Alves possui graduação em engenharia de produção (2012) e especialização em gerenciamento de projetos (2012) pelo UniFOA. Possui experiência em desenvolvimento de produto na área automotiva. Amplo conhecimento em gestão, planejamento e desenvolvimento de veículos, ultimamente focando em sistemas de segurança veicular passiva.



Wendell de Queiróz Lamas possui graduação em tecnologia em técnicas digitais pela UNESA (1991), mestrado em engenharia mecânica pela UNITAU (2004) e doutorado em engenharia mecânica pela UNESP (2007). Atualmente é professor doutor na EEL-USP. Tem experiência na área de energia, com ênfase em análise e otimização de sistemas alternativos de geração de energia, atuando principalmente nos seguintes temas: gestão energética e ambiental na indústria; otimização de sistemas energéticos; eficiência energética (incluindo cogeração).