

Análise de Desempenho dos Veículos Elétricos por Simulação Computacional

Luiz Artur Pecorelli Peres

Mariana Dias da Silva

Marcus Vinicius De Mello Oliveira

Priscila Alves Farias

III Semana de Produção Científica e Tecnológica - Faculdade de
Engenharia da UERJ

2005

Rio de Janeiro

Análise de Desempenho dos Veículos Elétricos por Simulação Computacional

LUIZ ARTUR PECORELLI PERES¹
MARIANA DIAS DA SILVA¹
MARCUS VINICIUS DE MELLO OLIVEIRA¹
PRISCILA ALVES FARIAS¹

¹ UERJ - Universidade do Estado do Rio de Janeiro
(Grupo de Estudos de Veículos Elétrico – GRUVE)

Rua São Francisco Xavier 524 sl.5029 - A, CEP 20550-900, Rio de Janeiro, RJ, Brasil

RESUMO

Perante a crescente poluição da atmosfera, tornou-se necessária a procura por tecnologias que possam diminuir os danos ambientais decorrentes. Neste cenário, um dos principais vilões são os veículos a combustão interna cujas emissões são nocivas à saúde e também provocam, adicionalmente, desequilíbrios no efeito estufa do planeta. Além do aspecto das emissões, tais veículos são fontes de poluição sonora de grande magnitude nos centros urbanos. Para fazer face a estes impactos, os veículos elétricos constituem uma alternativa viável, pois podem diminuir de forma sensível os efeitos descritos. Neste trabalho é apresentado um estudo do desempenho de um veículo elétrico típico, a bateria, com motor de corrente contínua, através de simulações computacionais das variáveis de interesse em um percurso típico. São caracterizados os dados de entrada e os resultados obtidos em forma de tabelas e gráficos. As análises efetuadas permitem estabelecer conclusões satisfatórias quanto a maior eficiência e economia da utilização dos veículos elétricos.

Palavras-chave: Veículo elétrico, meio-ambiente, simulação, transporte, energia.

ABSTRACT

Since the growing levels of atmosphere pollution, the search for new technologies became necessary in order to reduce the environmental damage. On this scenery, one of the most important problems to be solved are the smoke emissions of explosion-type motors that, besides being damaging to health, can also enhance the accumulation of CO₂ on the atmosphere. Further, these vehicles are also generators of great levels of noise-pollution in biggest cities. The use of electrical vehicles is a viable alternative to withstand the problems described. This work presents a study about the performance of a typical electrical vehicle, battery-powered, direct current motor, using computer-aided simulations of the variables of interest on a typical course. The starting data and the results are expressed as tables and graphics. The analysis made allows acquisition of satisfactory conclusions about the greater efficiency and economy that comes from the use of electrical vehicles.

Keywords: electrical vehicles, environment, simulation, transport, energy.

1 INTRODUÇÃO

O GRUVE - Grupo de Estudos de Veículos Elétricos é uma agremiação que tem como objetivo desenvolver pesquisas e promover eventos culturais visando à difusão e o estímulo ao uso dos veículos elétricos. Sua missão é estudar e pesquisar os veículos de propulsão elétrica visando: a sua eficiência energética bem como dos processos envolvidos, a extensão dos conhecimentos adquiridos à sociedade, o benefício dos usuários, a adequação destes

veículos à realidade brasileira e a preservação do meio ambiente, sob a égide do desenvolvimento sustentável.

No âmbito do GRUVE o veículo elétrico é estudado nos seus aspectos tecnológicos, como meio de locomoção, das suas implicações na cadeia energética e também da sua inserção no setor de transportes para o qual se antevê amplos benefícios ambientais. Neste panorama o veículo elétrico, nas diversas modalidades, seja híbrido, na qual se destaca o emprego de células a

combustível, ou seja à bateria, presente em diversos utilitários, se destacam.

Tendo em vista a importância da análise do desempenho dos veículos elétricos são então simuladas condições típicas de funcionamento. Entre as ferramentas computacionais utilizadas destacam-se o MATLAB 6.5 e o SIMPLIV 3.1, sendo este último um simulador do veículo elétrico que é útil para verificar o funcionamento do veículo elétrico e seus componentes a partir da entrada de parâmetros pelo o usuário.

Neste relatório são apresentadas simulações de um veículo elétrico típico a bateria com motor de corrente contínua. São caracterizados os dados de entrada e os resultados obtidos em forma de gráficos. Também são apresentadas conclusões sobre o funcionamento do veículo.

2 DESCRIÇÃO DO VEÍCULO

O veículo elétrico considerado é equipado com baterias chumbo-ácido e motor de tração de corrente contínua, cujo modelo foi denominado como ETV-1.

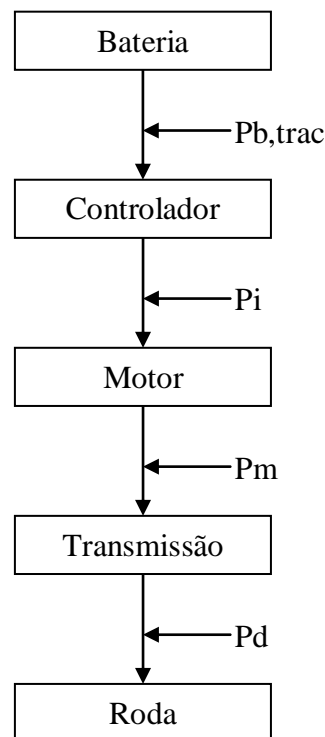
2.1 Características Básicas do Veículo Considerado:

A Tabela 2.1 em seguida apresenta os dados básicos considerados:

Descrição	Valor (SI)
Peso do Chassi	983kg
Peso da Carga	201 kg
Peso da bateria	803 kg
Peso total do veículo	1987 kg
Coefficiente de resistência aerodinâmica	0,320
Área frontal	1,84 m ²
Coefficiente de resistência do rolamento	0,0095
Coefficiente de resistência do rolamento	1,640E-06s/m
Coefficiente de atrito	0,670
Fração do peso nas rodas de tração	0,500
Raio da roda	0,280 m
Fração de regeneração	0,350

2.2 Esquema Funcional do ETV-1

O veículo simulado é um típico veículo elétrico a bateria, cujo funcionamento pode ser entendido pelo esquema abaixo apresentado na Figura 2.2.1:



$P_{b,tract}$ (potência de tração da interface bateria/ controlador)

P_i (potência da interface motor/ controlador)

P_m (potência do motor)

$P_{b, total}$ (potência total da bateria)

Figura 2.2 Esquema básico de um veículo elétrico

2.3 Dados do veículo

2.3.1 Dados do banco de baterias

O banco de baterias utilizado é composto de 18 módulos. Cada módulo, dotado de três células, apresenta uma capacidade de 115Ah cada um, portanto o veículo possui uma capacidade de 2070Ah. Cada célula da bateria é caracterizada pela a tabela

2.3.1, que contém a profundidade de descarregamento da célula, bem como a tensão de circuito aberto e a relação das variações de tensão e corrente, dV/dI , para cada estado de descarregamento. A célula caracterizada abaixo é de uma bateria chumbo ácido.

Tabela 2.3.1 Mapeamento da Bateria

DOD (%)	Voc (Volt)	dV/dI
0	2,08	-0,0012
0,1	2,075	-0,0012
0,2	2,07	-0,00121
0,3	2,057	-0,00121
0,4	2,044	-0,00121
0,5	2,022	-0,00122
0,6	2,004	-0,00124
0,7	1,981	-0,00124
0,8	1,949	-0,00131
0,9	1,913	-0,00144
1	1,884	-0,00176

Na figura abaixo é apresentado um esquema simplificado do circuito da bateria:

Onde Voc é a tensão de circuito aberto da bateria, dV/dI e a variação relativa entre a tensão e a corrente e Ib é a corrente exigida da bateria.

A seguir são apresentados os gráficos referentes às tensões de circuito aberto e dV/dI para cada fase do descarregamento da bateria

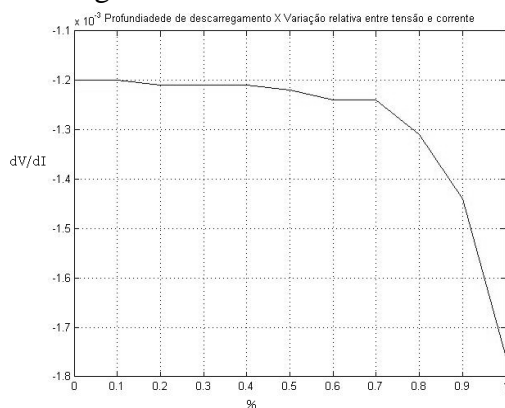


Figura 2.3.1-1 Figura dos Dados da Bateria

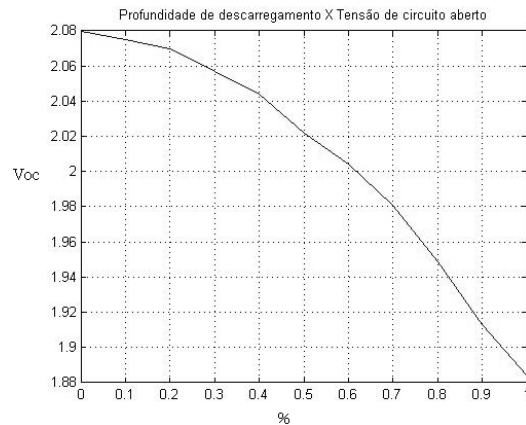


Figura 2.3.1-2 Figura dos Dados da Bateria

2.3.2 Dados do Inversor

O comportamento do inversor foi considerado a partir da sua eficiência em relação à curva torque – velocidade do motor do veículo. A velocidade foi adotada na faixa 0 a 6000 RPM e o torque na faixa de -271.2 Nm a + 271.2 Nm. Para todos os pontos admitiu-se a eficiência ideal de 100%.

2.3.3 Dados do Motor

O motor é do tipo corrente contínua série. A tabela 2.3.3 relativa ao torque-velocidade apresenta os valores de isoeffiência, e conforme, mostrada abaixo, estão destacados apenas os valores para torque positivos uma vez que estes se repetem para torques negativos:

Tabela 2.3.3 Tabela de Torque e Velocidade com Isoeficiência do Motor:

Torque (N.m)	Velocidade (RPM)				
	0	1000	2000	3000	4000
0	0.298	0.38	0.694	0.869	0.833
14	0.422	0.559	0.78	0.885	0.884
27	0.506	0.678	0.833	0.893	0.893
41	0.568	0.719	0.825	0.842	0.813
54	0.588	0.729	0.831	0.817	0.79
68	0.618	0.735	0.829	0.808	0.787
81	0.664	0.737	0.813	0.815	0.806

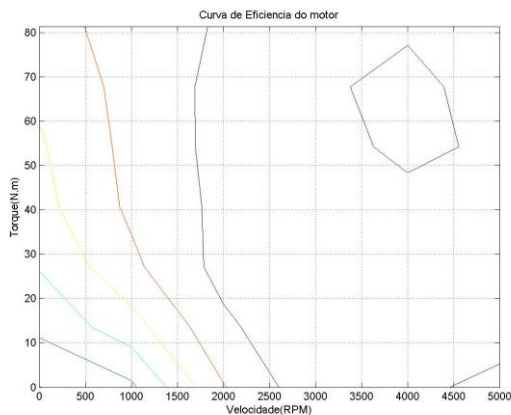


Figura 2.3.3 –1 Curva de Torque e Velocidade com Isoeficiência do Motor

2.3.4 Dados do Sistema de Transmissão Mecânica do Veículo

O sistema de transmissão do veículo é de velocidade simples, isto é, possui apenas uma velocidade. A fração de transmissão do câmbio de 5,48. Na Tabela 2.3.4 estão destacados apenas os valores para torque positivos uma vez que estes se repetem para torques negativos:

Tabela 2.3.4 Torque x Velocidade

Torque (N.m)	Velocidade (RPM)				
	0	200	400	600	800
0	0.788	0.915	0.939	0.938	0.933
136	0.812	0.925	0.945	0.942	0.937
271	0.88	0.951	0.962	0.954	0.946
407	0.91	0.954	0.966	0.96	0.949
542	0.924	0.957	0.969	0.965	0.958
678	0.93	0.96	0.97	0.97	0.96

2.3.5 Dados do Percurso do Veículo

Os veículos são testados a partir de ciclos de teste que constituem o comportamento da velocidade em relação ao tempo. Para o veículo considerado admitiu-se um ciclo típico constando de partida de aceleração constante seguido de trecho com velocidade constante, frenagem e repouso. O percurso encontra-se a seguir, representado na Figura 2.3.5.

Nas abscissas consta o tempo em segundos e nas ordenadas constam as velocidade de deslocamento do veículo em km/h..

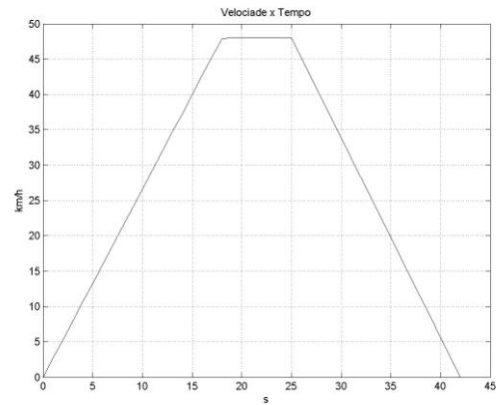


Figura 2.3.5 - Velocidade do veículo em relação ao tempo

2.3.6 Dados do Arquivo de Inclinação e Direção do Veículo

Foram feitas duas simulações, variando a inclinação da estrada, que o veículo percorre, sendo elas:

Simulação 1 – Foi considerada a estrada plana, não envolvendo nenhum grau de inclinação para estrada. E a direção do veículo é também estabelecida em 0 grau, indicando nenhuma curva no percurso.

Simulação 2 – Foi considerada a estrada com um ligeiro aclive, tendo 2% de inclinação.

A direção do veículo é também estabelecida em zero grau, indicando nenhuma curva no percurso.

Com base nesses arquivos, foram feitas duas simulações distintas considerando todas as condições anteriores pra ambas.

3- SIMULAÇÃO

3.1 Equações Matemáticas

Explicação das Equações Mecânicas Utilizadas Explicação dos Cálculos com base no mapeamento dos componentes

A potencia para movimenta o veículo e calculada a partir da seguinte equação:

$$P(t) = P_{acc} + P_{grade} + P_{aero} + P_{rolling} + P_{bearing}$$

Cada componente da equação é calculado como se segue:

$$P_{acc} = (M_e \cdot dv(t)/dt) \cdot v(t)$$

$$P_{\text{grade}} = W \cdot \sin(\theta) \cdot v(t)$$

$$P_{\text{aero}} = [1/2 \rho C_d(\gamma) \cdot A v_r(t)^2] \cdot v(t)$$

$$P_{\text{rolling}} = [(C_0 + C_1 v(t) + C_2 v(t)^2 + C_3 v(t)^3) \cdot W] \cdot v(t)$$

$$P_{\text{bearing}} = \tau_B \cdot S_w(t)$$

Sendo que:

$P(t)$ - potência instantânea para deslocar o veículo

P_{acc} - potência de inércia associada a aceleração e desaceleração

P_{grade} - potência associada aos aclives

P_{aero} - potência de resistência aerodinâmica

P_{rolling} - potência de resistência ao rolamento das rodas

P_{bearing} - potência das resistências aos atritos internos

M_e = massa equivalente, incluindo inércia rotacional de 3% do peso do veículo.

g = aceleração da gravidade

ρ = densidade do ar

$C_d(\gamma)$ = coeficiente de resistência aerodinâmica, função da direção do vento.

A = área frontal do veículo

$v(t)$ = velocidade do veículo em função do tempo

$v_r(t)$ = velocidade do vento em relação a direção do percurso em função do tempo

C_0, C_1, C_2, C_3 = coeficientes de resistência ao rolamento

W = peso do veículo

τ_B = coeficiente de resistência das partes mecânicas

θ = ângulo em graus de inclinação da via

$S_w(t)$ = velocidade da roda em função do tempo

Através dessas equações mecânicas e dos mapeamentos de eficiência do controlador, do motor e da transmissão é possível calcular a potência exigida da bateria, como segue:

$$\eta_i = P_i / P_{b, \text{trac}}$$

$$\eta_m = P_m / P_i$$

$$\eta_{\text{trans}} = P_m / P_d$$

Sendo:

η_m (eficiência do motor)

η_i (eficiência do inversor)

η_{trans} (eficiência da transmissão)

3.2 Resultados

3.2.1 Resultados para zero grau de inclinação da estrada

Os gráficos abaixo são referidos a simulação 1 como base para os cálculos executados pelo Simplev.

Figuras referentes à bateria:

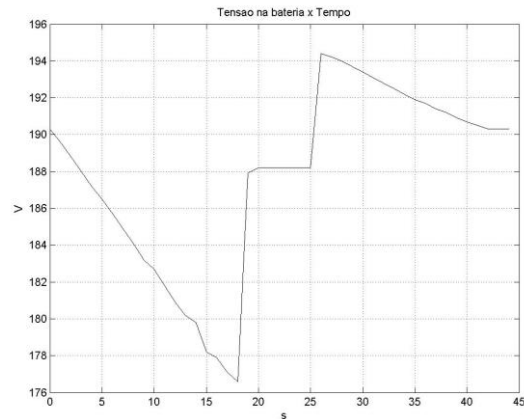


Figura 3.2.1 – 1: Tensão na bateria

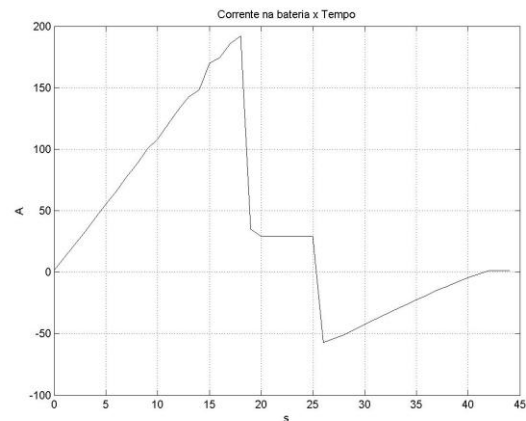


Figura 3.2.1 – 2: Corrente na bateria

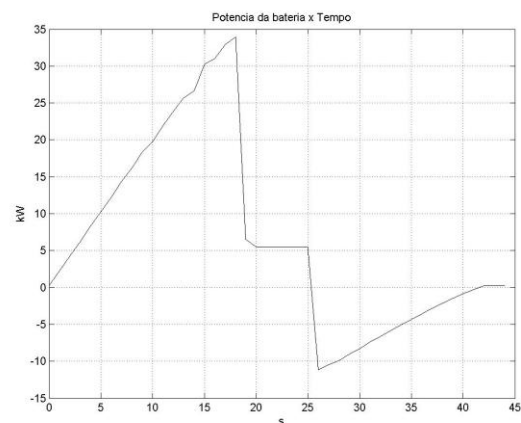


Figura 3.2.1 – 3: Potência da bateria

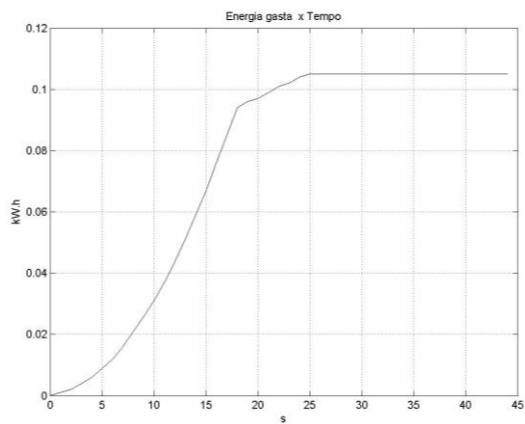


Figura 3.2.1 - 4: Energia gasta

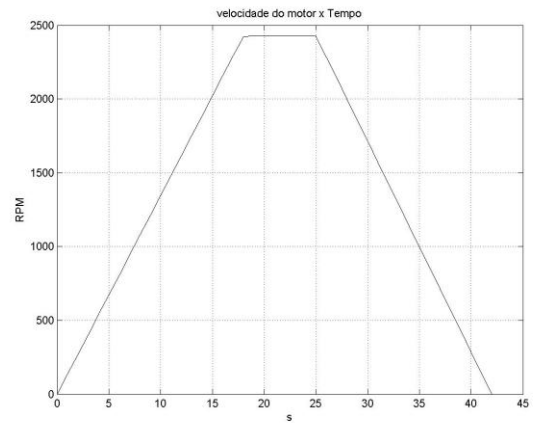


Figura 3.2.1 - 7: Velocidade do motor

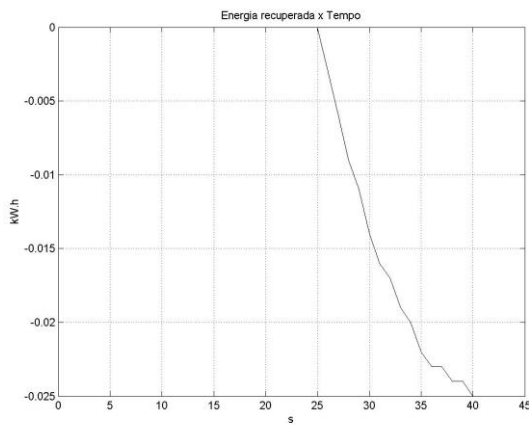


Figura 3.2.1 - 5: Energia recuperada

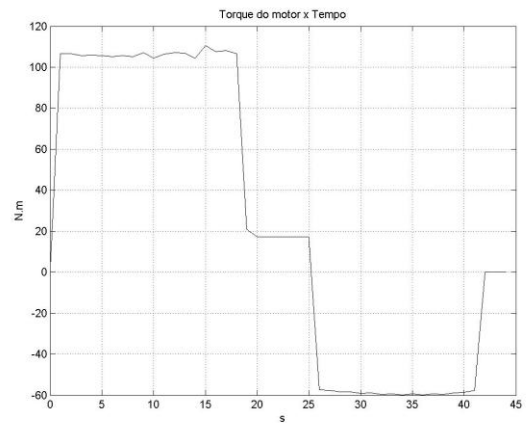


Figura 3.2.1 - 8: Torque do motor

Figuras referentes ao motor:

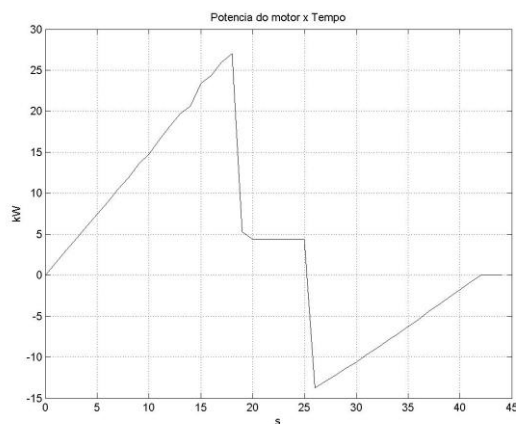


Figura 3.2.1 - 6: Potência do motor

Figura referente à transmissão:

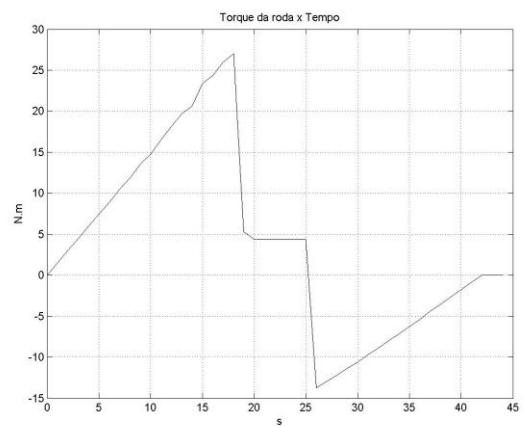


Figura 3.2.1 - 9: Torque na roda

Total de quilômetros percorrido pelo veículo: 0.328km

Carga fornecida pela bateria: 5.37 Ah

3.2.2 Resultados para 2% de inclinação da estrada

As tabelas e gráficos abaixo são referido a simulação 2 como base para os cálculos executados pelo Simplev.

Figuras referentes à bateria:

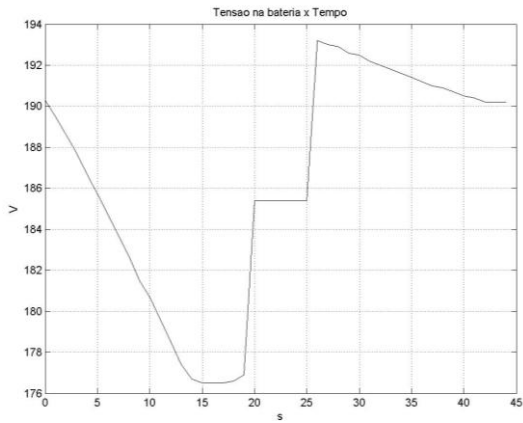


Figura 3.2.2 – 1: Tensão na bateria

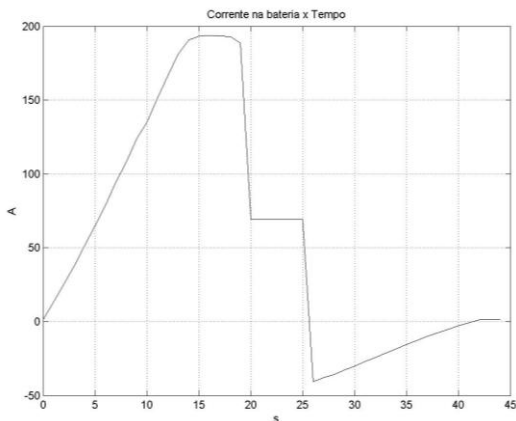


Figura 3.2.2 – 2: Corrente na bateria

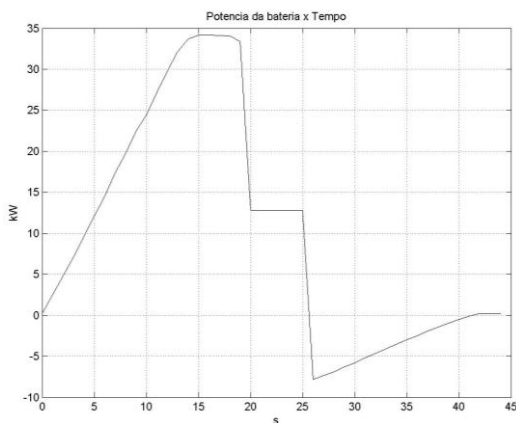


Figura 3.2.2 – 3: Potência da bateria

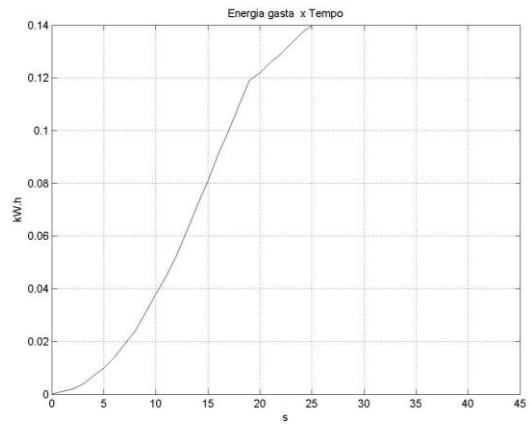


Figura 3.2.2 – 4: Energia gasta

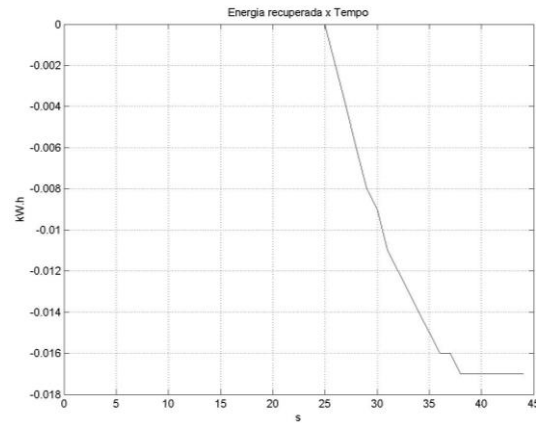


Figura 3.2.2 – 5: Energia recuperada

Figuras referentes ao motor:

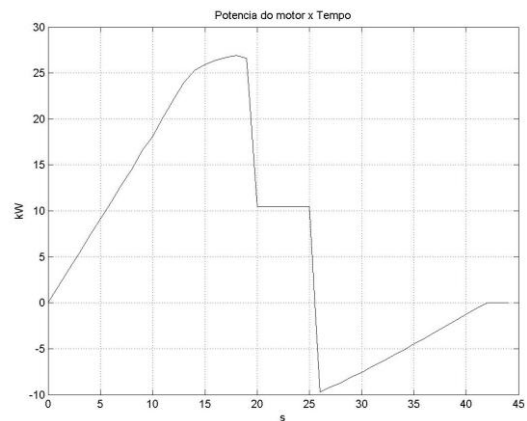


Figura 3.2.2 – 6: Potência do motor

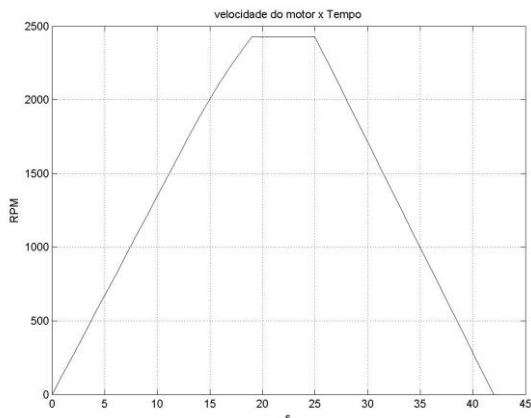


Figura 3.2.2 – 7: Velocidade do motor

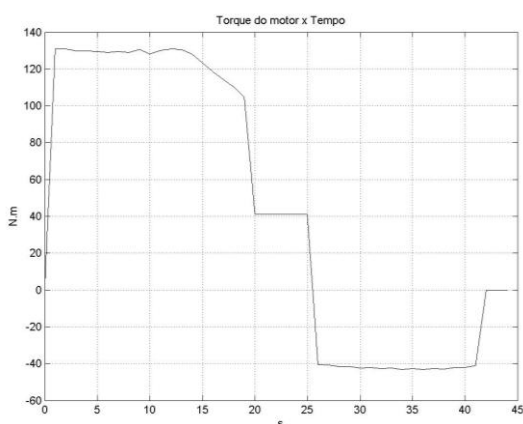


Figura 3.2.2 – 8: Torque do motor

Figura referente à transmissão:

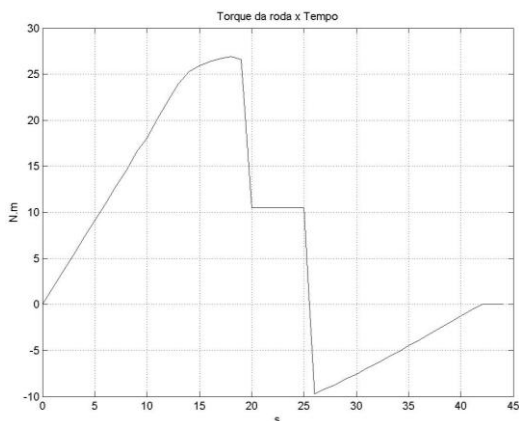


Figura 3.2.2 – 9: Torque na roda

Total de quilômetros percorrido pelo veículo: 0.327km
Energia total gasta: 8.26 Ah

4- Conclusões

Através dos dados apresentados pode-se observar que as simulações se mostram coerentes com a realidade, como por exemplo, a queda gradativa da tensão da bateria acompanhada do aumento da corrente no período de maior exigência correspondente a aceleração inicial. Também é mostrado na simulação 2, quando o veículo está considerado funcionando em uma estrada com um ligeiro acento, gasta mais energia do que o mesmo veículo na simulação 1, onde o veículo se encontra em uma estrada plana. Deve-se ser comentado o fato de que os gráficos de potência apresentam valores negativos provenientes da frenagem. O freio regenerativo simulado no veículo permitiu uma recuperação da carga da bateria conforme é apresentado.

As simulações realizadas permitiram constatar que a carga utilizada pelo banco de baterias do veículo atingiu 5.37 Ah por ciclo. Nestas circunstâncias é possível apresentar então, uma previsão aproximada do número de ciclos possíveis de percurso com base na capacidade total. Portanto, foram estimados 385 ciclos, ou seja, cerca de 126 km de autonomia para uma estrada plana (Simulação 1). Para a estrada com um ligeiro acento (Simulação 2) a carga despendida pelo banco de baterias foi 8.26 Ah por ciclo. Neste caso o veículo teria uma autonomia menor ou seja de 250 ciclos que correspondem a 82 km. Vale mencionar que estas estimativas são otimistas visto que o comportamento de descarga da baterias não é linear. Este estudo foi importante para validação dos modelos de simulação desenvolvidos pelos autores, pois foi possível comprová-los com a ferramenta computacional empregada.

REFERÊNCIAS

BOTTURA, C. P. BARRETO, G. 1989. *Veículos Elétricos*. Campinas: Editora da Unicamp.

HANSELMAN, D. & LIULEFIELD, B.
MATLAB 5 - Versão do Estudante – Guia
do Usuário. São Paulo: Makron Books,
1999.

PERES, L. A. P. & NOGUEIRA, L.A.H.
& TORRES, G.L. 1997. *Influências sobre
os sistemas de energia com a introdução
dos veículos elétricos na sociedade*. In:
III Congresso Latino-Americano
Geração-Transmissão De Energia
Elétrica, Campos do Jordão, SP

PECORELLI PERES, Luiz A.; HORTA,
Luiz A. N.; LAMBERT-TORRES,
Germano. *Analysis and Discussion on
Energy Supply to Non-Road Electric
Vehicles in Brazil*. IEEE POWER
ENGINEERING SOCIETY - T&D 2002
LATIN AMERICA CONFERENCE, São
Paulo – Brazil, 2002.

. PECORELLI PERES, Luiz A., *Veículos
Elétricos: Benefícios Ambientais e
Energéticos*, CD, Rio de Janeiro:
Associação Cultural e de Pesquisas Noel
Rosa, 2003. ISBN: 85-89640-01-9.

PECORELLI PERES, L. A. -
*Dissemination of Electric Vehicle
Technology Through an Educational CD.
Evaluation and Recent Experience in
Brazil* - ELE-DRIVE
TRANSPORTATION Conference &
Exhibition, Estoril Congress Center,
Lisboa , Portugal, March 17 to 20, 2004.