

**10º Salão Latino-Americano de Veículos Elétricos, Componentes e Novas Tecnologias**  
**São Paulo, 4 a 6 de Setembro de 2014**

**APLICATIVO PARA ESTUDOS E ANÁLISES DE DESEMPENHO**  
**DE VEÍCULOS ELÉTRICOS**

**David Soares<sup>1</sup>, (davidsoares@gmail.com)**

**Félix do Rêgo Barros<sup>2</sup>, (felixregobarros@gmail.com)**

**Luiz Artur Pecorelli Peres<sup>3</sup>, (lapp\_uerj@yahoo.com.br)**

<sup>1</sup>UERJ – CCT – Rua Fonseca Teles, 121 – Bloco Anexo – São Cristóvão – CEP: 20940-903.

<sup>2</sup>CEFET/RJ – Uned Maria da Graça - R. Miguel Ângelo, 96 – Maria da Graça, Rio de Janeiro  
RJ, CEP:20785-902.

<sup>3</sup>UERJ – Laboratório de Sistemas de Propulsão Veicular e Fontes Eletroquímicas – LSPV –  
Rua Fonseca Teles, 121 – Sala L-15 - São Cristóvão – Rio de Janeiro – RJ CEP:  
20940-903.

**Resumo:** A crescente conscientização a respeito do aquecimento global tem contribuído para o aumento da substituição de utensílios baseados em queima de combustível fóssil por equipamentos elétricos de maior eficiência. Dentre estas substituições pode-se destacar a dos veículos de combustão interna por veículos elétricos. Apesar do amadurecimento coletivo com respeito à preservação do planeta, o fator decisivo na migração em massa do veículo de combustão interna para o elétrico ainda é o econômico. Para que os veículos elétricos possam atingir as mesmas características de aceleração, autonomia e conforto (climatização) dos de combustão interna há a necessidade de um aprimoramento das políticas públicas visando a viabilização dos veículos elétricos em prol da eficiência energética e do meio ambiente. Diante disto, este trabalho visa desenvolver um aplicativo que sirva de ferramenta para estimar a autonomia de veículo elétrico utilizando alguns parâmetros básicos, tais como o peso do veículo, potência e curva de rendimento do motor, tipo de bateria (com o respectivo coeficiente de *Peukert*) e proporcionar aos estudantes e pesquisadores uma ferramenta confiável para o estudo de um veículo elétrico em diversas situações. O aplicativo possui um caráter educativo e de promoção dos benefícios da tecnologia veicular elétrica. Inicialmente é apresentada a metodologia empregada no desenvolvimento do aplicativo e sua estrutura. Posteriormente são apresentados os resultados do aplicativo e a validação através da

comparação dos resultados com os existentes na literatura do artigo. O desenvolvimento deste artigo foi elaborado no âmbito das atividades do Laboratório de Sistemas de Propulsão Veicular e Fontes Eletroquímicas - LSPV da UERJ que atua em parceria com a Ampla Energia e Serviços S.A, cujo Projeto de P&D Cidade Inteligente Búzios sob os auspícios da Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL abrange o tema relacionado ao desempenho e abastecimento de veículos elétricos.

**Palavras chave:** *Veículo elétrico, Eficiência, Aplicativo, Autonomia.*

## INTRODUÇÃO

Os primeiros veículos elétricos para demonstração foram feitos na década de 1830 e os primeiros veículos comerciais já estavam disponíveis no final do século XIX.

Estes veículos utilizavam baterias não recarregáveis e foram necessários 50 anos para que as baterias se desenvolvessem a ponto de poderem ser utilizadas em carros elétricos comerciais. Somente no final do século XIX, com a produção em massa de baterias recarregáveis, os veículos elétricos começaram a serem bastante utilizados e já no início do século XX, os veículos elétricos tornaram-se preferência além de um forte candidato para o transporte rodoviário futuro.

O veículo elétrico sempre foi confiável e teve um começo instantâneo, enquanto que os veículos com motor de combustão interna eram pouco confiáveis, malcheirosos e precisavam de partida manual para começar a funcionar. Por volta de 1920 centenas de milhares de veículos elétricos foram produzidos (carros, vans, táxis, veículos de entrega e ônibus). Apesar da promessa dos primeiros veículos elétricos, o combustível fóssil barato ficou amplamente disponível e o motor de arranque (inventado em 1911) para a partida do motor de combustão interna fez, do motor de combustão interna, uma opção mais atraente. Ironicamente, o principal mercado para baterias recarregáveis, desde então, tem sido para a partida de motores de combustão.

A energia específica (energia por unidade de massa) dos combustíveis a base de petróleo ou etanol/metanol e das baterias chumbo-ácido possuem a seguinte característica:

Comb. interna  $\cong$  9.000 Wh/kg

$\eta_{CI} \cong 20\% \Rightarrow E_{CI} \cong 1.800$  Wh/kg

Bateria  $\cong$  30 Wh/kg

$$\eta_{\text{Ele}} \cong 90\% \Rightarrow E_{\text{Ele}} \cong 27 \text{ Wh/kg}$$

Assim, para se percorrer 50 km com um veículo de combustão interna necessita-se de, aproximadamente, 4,5 litros (1,0 galão) ou 4,0 kg, enquanto um veículo elétrico necessita de 270 kg de baterias. Para se percorrer o dobro da distância necessitamos de, pelo menos, dobro do peso, ou seja, 8,0 kg (combustível a base de petróleo) contra os 540 kg de baterias (não considerando a energia necessária para a aceleração e desaceleração do peso extra). Entretanto, o promissor avanço das fontes eletroquímicas de última geração vem demonstrando um significativo aumento da autonomia dos veículos elétricos como vem sendo demonstrado por modelos que reúnem condições de funcionarem até mesmo como táxis em centros urbanos.

Um sistema de freios regenerativo, o qual transforma energia cinética em elétrica e recarrega as baterias, pode recuperar até 20% dessa energia.

O tempo de abastecimento também é um fator que dificulta a transição, pois são necessários apenas alguns minutos para abastecer um veículo de combustão interna, mas algumas horas para a recarga das baterias. Existe ainda o fator custo referente às baterias, já que o proprietário do veículo terá uma despesa de £8000 (US\$ 12.651,20 ou R\$ 25.618,40) a cada 5 anos (vida útil das baterias). Mesmo assim, esta troca pode ter um grande abatimento visto que as baterias de tração poderão ser aplicadas durante vários anos como baterias estacionárias.

Para o transporte de massa existe a opção de linhas aéreas de energia (trens e trólebus), porém o alto custo de implantação e o impacto arquitetônico negativo desencorajam o uso desta opção em várias cidades. Neste caso ônibus elétricos híbridos tem se mostrado bastante viáveis quando empregados em sistemas conhecidos como BRTS em diversas capitais.

Até o final do século XX os veículos elétricos ainda não haviam conseguido o enorme sucesso dos veículos de combustão interna (IC). Entretanto, contabiliza-se atualmente um forte crescimento da sua comercialização no mundo que atingiu o expressivo montante de 22 milhões de veículos comercializados ao final de 2013 conforme a revista *Electrification* do IEEE.

Preocupações com o meio ambiente (emissões na atmosfera e sonoras, especialmente), acoplado a novos desenvolvimentos em baterias e células de combustível podem contribuir para um equilíbrio a favor dos veículos elétricos (Larminie et al., 2003).

## METODOLIGIA EMPREGADA

Para todos os veículos a estimativa do desempenho e da autonomia é muito importante. Os veículos elétricos possuem algumas características que permitem uma modelagem matemática do desempenho e da autonomia mais fácil do que para os outros tipos de veículos (Larminie et al., 2003).

### Forças atuantes em um veículo

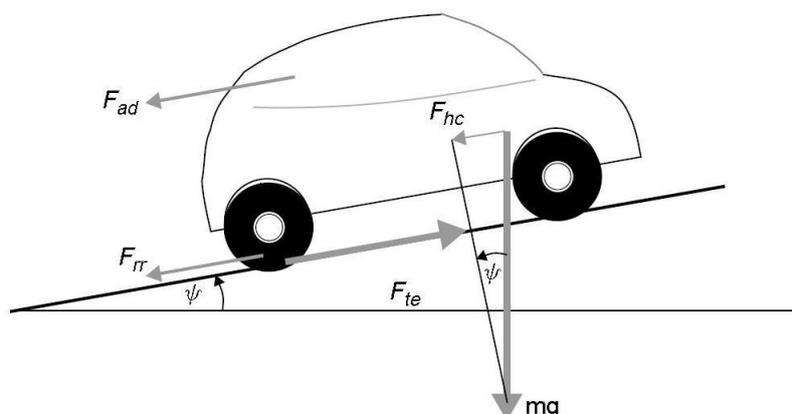
A força de propulsão (tração) do veículo (Figura 1), para movê-lo, deverá conseguir vencer as diversas forças que atuam num veículo. São elas:

Resistência à rolagem ( $F_{rr}$ );

Arraste aerodinâmico ( $F_{ad}$ );

A componente de peso do veículo durante a subida de um aclive ( $F_{hc}$ );

Aceleração (aumento de velocidade).



**Figura 1 - Forças atuantes em um veículo (adaptado de Larminie et al., 2003).**

A força de resistência à rolagem ( $F_{rr}$ ) – Eq. (1) é consequência do:

Atrito (interno) nos rolamentos;

Atrito entre o pneu e o pavimento;

É dada pela equação:

$$F_{rr} = \mu_{rr} \cdot m \cdot g \quad (1)$$

Onde:

$\mu_{rr}$  é o coeficiente de resistência à rolagem;

$m$  é a massa do veículo;

$g$  é a aceleração da gravidade local.

O *arrasto aerodinâmico* é a força (de atrito) que o ar exerce sobre um corpo em movimento – Eq. (2):

$$F_{ad} = \frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot C_d \cdot v^2 \quad (2)$$

Onde:

$\rho$  é a densidade do ar;

$A$  é a área (frontal) do veículo;

$v$  é a velocidade do veículo;

$C_d$  é o coeficiente de arrasto (proporcional à aerodinâmica do veículo).

O coeficiente  $C_d$  possui os seguintes valores típicos:

0,30 para veículos típicos;

0,19 para alguns veículos elétricos;

0,70 para ônibus e motos.

A componente do peso do veículo durante a subida de um aclave é contrária à direção de subida – Eq. (3):

$$F_{hc} = m \cdot g \cdot \text{sen}(\psi) \quad (3)$$

Onde:

$m$  é a massa do veículo;

$g$  é a aceleração da gravidade local;

$\psi$  é o ângulo (*slope*) da rampa.

A força de aceleração é responsável pela aceleração linear do veículo e é dada equação Newtoniana clássica – Eq. (4).

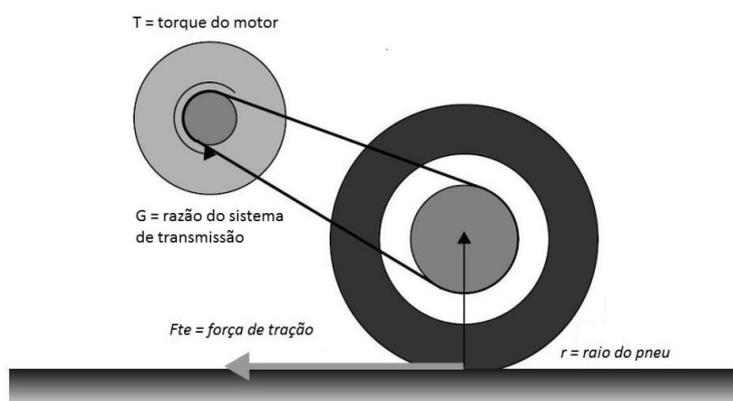
$$F_{la} = m.a \quad (4)$$

Onde:

$m$  é a massa do veículo;

$a$  é a aceleração do veículo.

Para o estudo desta força deve-se levar em consideração o sistema de transmissão do veículo, pois esta força aparece multiplicada por um fator ampliador ou redutor que depende do sistema de transmissão. Para este estudo foi utilizado o modelo da Figura 2.



**Figura 2 - Modelagem do sistema de transmissão de um veículo (Adaptado de Larminie et al., 2003)**

A aceleração linear é consequência da aceleração angular – Eq. (5).

$$F_{te} = \frac{G}{r} T \quad (5)$$

Onde:

$G$  é a razão de raios do sistema de tração;

$r$  é o raio do pneu;

$T$  é o torque do motor.

A rotação do motor pode ser expressa pela Equação (6).

$$\omega = G \frac{v}{r} \quad (6)$$

Onde:

$G$  é a razão de raios do sistema de tração;

$r$  é o raio do pneu;

$v$  é a velocidade do veículo.

A aceleração angular no motor pode ser expressa pela Equação (7).

$$\dot{\omega} = G \frac{a}{r} \quad (7)$$

Onde:

$G$  é a razão de raios do sistema de tração;

$r$  é o raio do pneu;

$a$  é a aceleração do veículo

Assim, o torque do motor necessário à aceleração do veículo é dado pela Equação (8).

$$T = I.G. \frac{a}{r} \quad (8)$$

Onde:

$G$  é a razão de raios do sistema de tração;

$I$  é o momento de inércia do eixo do motor;

$r$  é o raio do pneu;

$a$  é a aceleração do veículo.

E a força nos pneus ( $F_{\alpha\alpha}$ ), necessária para a aceleração angular, é calculada pela equação (9).

$$F_{\alpha\alpha} = I \frac{G^2}{\eta_g r^2} a \quad (9)$$

Onde:

$G$  é a razão de raios do sistema de tração;

$I$  é o momento de inércia do eixo do motor;

$r$  é o raio do pneu;

$a$  é a aceleração do veículo;

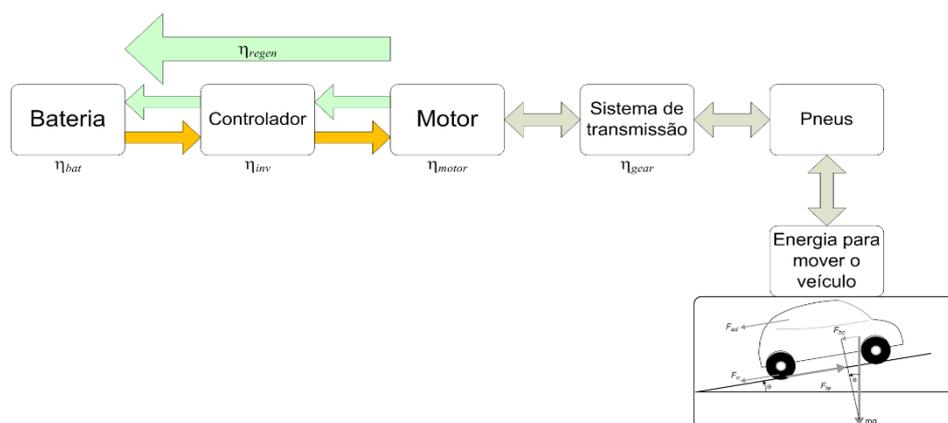
$\eta_g$  é o rendimento do sistema de tração.

A força da tração total, agora, é dada pelo somatório das forças – Eq. (10).

$$F_{te} = F_{rr} + F_{ad} + F_{hc} + F_{la} + F_{oa} \quad (10)$$

### Modelagem de um veículo elétrico

Para fins de modelagem, o veículo elétrico pode ser aproximado pelo diagrama de blocos apresentado na Figura 3.



**Figura 3 - Fluxo de energia de um veículo elétrico (Adaptado de Larminie et al., 2003)**

A estimativa da autonomia depende da energia necessária para a movimentação do veículo e é calculada a cada segundo, até que a bateria descarregue. Se o tempo de amostragem for de um segundo, o valor da potência e da energia é igual.

A potência total consumida pela bateria é dada pelo somatório de todas as potências parciais Equação 11a de acordo com [Peccorelli et al., 2007].

$$P_t = P_i + P_{rr} + P_{ad} + P_d \quad (11a)$$

Onde:

$P_i$  é a potência dissipada referente à inércia e é dada pela Equação 11b;

$P_{rr}$  é a potência dissipada referente à resistência de rolamento e é dada pela Equação 11c (onde o fator  $K$  é dado pela Equação 11d);

$P_{ad}$  é a potência dissipada referente à força de arrasto e é dada pela Equação 11e;

$P_d$  é a potência referente à força necessária para o veículo alterar a altura (energia potencial) e é dada pela Equação 11f.

$$P_i = M_e \cdot a \cdot v \quad (11b)$$

$$P_{rr} = K \cdot M_v \cdot g \cdot v \cdot \cos(\theta) \quad (11c)$$

$$K = 0,033 \left( 1 + \frac{v^2}{1500} \right) \quad (11d)$$

$$P_{ad} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot C_d \cdot v^3 \quad (11e)$$

$$P_d = M_v \cdot g \cdot v \cdot \sin(\theta) \quad (11f)$$

$M_v$  é a massa do veículo e

$M_e$  é a massa utilizada para o cálculo da inércia do veículo. Considera-se tanto a massa de inércia do veículo, quanto a massa de inércia de rotação do eixo do motor ( $M_e = M_v * I$ , onde  $I$  é um fator de adequação) (Larminie, 1993).

A energia consumida pelo sistema é calculada através da Equação 11 ( $t_{amostragem} = 1,0$  s).

$$E = \frac{1}{36 \cdot 10^5 \cdot \eta_a} \int_{t_0}^{t_1} P(t) dt \quad (11)$$

O sistema de tração de um veículo elétrico:

É muito simples;

Normalmente só possui uma engrenagem;

Assume-se que a eficiência deste sistema ( $\eta_g$ ) é alto e constante.

A eficiência do motor ( $\eta_m$ ) é calculada pela a Equação 12 e a Tabela 1 apresenta alguns valores típicos.

$$\eta_m = \frac{T\omega}{T\omega + k_c T^2 + k_i \omega + k_w \omega^3 + C} \quad (12)$$

Onde:

T é o torque fornecido pelo motor;

$k_c$  é a coeficiente de perda do cobre;

$k_i$  é o coeficiente de perda do ferro;

$k_w$  é o coeficiente da energia usada no sistema de ventilação do motor;

C é o coeficiente de perda constante (aplicável em qualquer velocidade).

**Tabela 1 - Valores típicos das constantes de um motor elétrico (Adaptado de Larminie et al., 2003)**

Parâmetro	Motor Lynch, tipo PM, com 2 escovas ( $P_{\text{motor}}=5\text{kW}$ )	Motor de indução de alta rotação ( $P_{\text{motor}} = 100 \text{ kW}$ )
$k_c$	1,5	0,3
$k_i$	0,1	0,01
$k_w$	$10^{-5}$	$5,0 \times 10^{-6}$
C	20	600

### Ciclos de condução

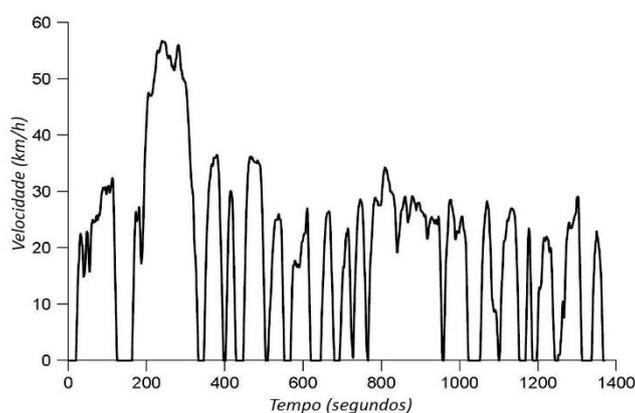
Existem várias formas de quantificar o desempenho de um veículo. Dentre elas, há dois tipos de cálculo (ou de teste) que são destacadas em Larminie, 1993:

Teste de velocidade constante (mais simples);

Perfis de velocidades (mais complexos).

Um dos mais conhecidos é o ciclo LA-04 que simula o ciclo num percurso típico em Los Angeles (Califórnia, USA). Este ciclo foi desenvolvido pela *Federal Urban Driving Schedule* e foi inicialmente criado para medir a emissão de poluentes de veículos de combustão interna.

São apresentados a seguir alguns dos tipos de ciclos mais difundidos.

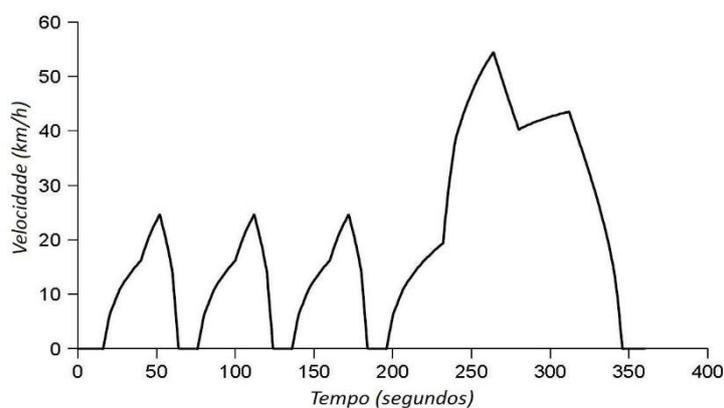


**Figura 4 - Ciclo LA 04**

O ciclo LA-04 (Figura 1) possui as seguintes características:

Tempo de teste de 1500 segundos;

É atribuída uma velocidade diferente para cada instante de tempo.



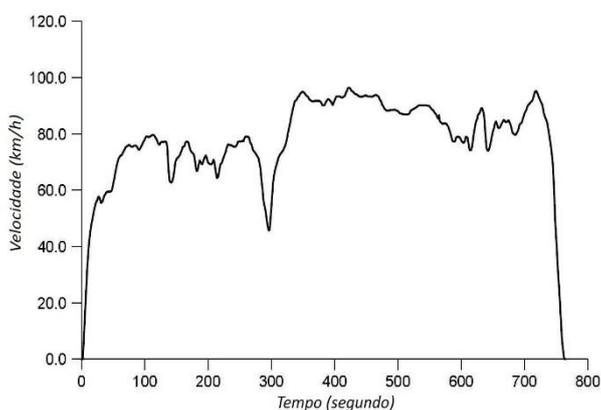
**Figura 5 - Ciclo LA 04 Simplificado**

O ciclo LA-04 Simplificado foi criado para simplificar os testes e adequado para:

Tempo de teste de 360 segundos;

Possuir a mesma velocidade média, a mesma proporção de tempo parado, a mesma aceleração e frenagem do ciclo LA-04 original;

Proporcionar o mesmo resultado na simulação da autonomia.

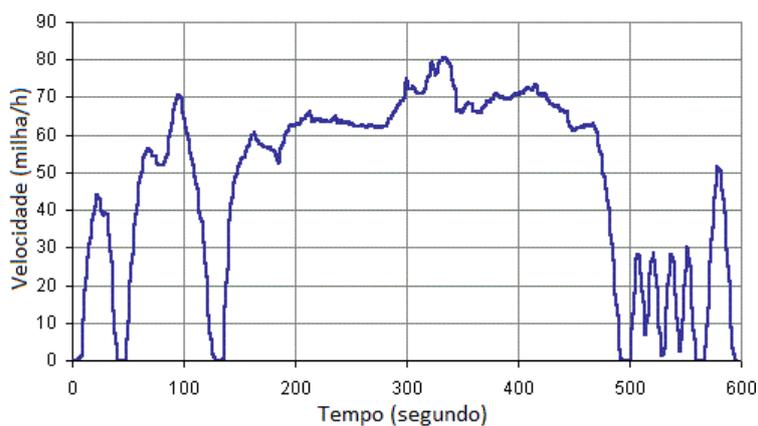


**Figura 6 - Ciclo 765**

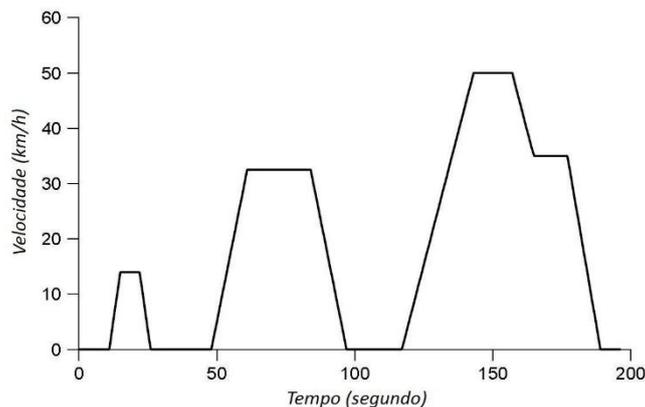
O ciclo 765 (Figura 6) foi desenvolvido para:

Simular o tráfego fora dos grandes centros;

Está sendo substituído por um ciclo mais moderno, denominado padrão SFTP-US06 (Figura 7).



**Figura 7 - Ciclo SFTP-US06**



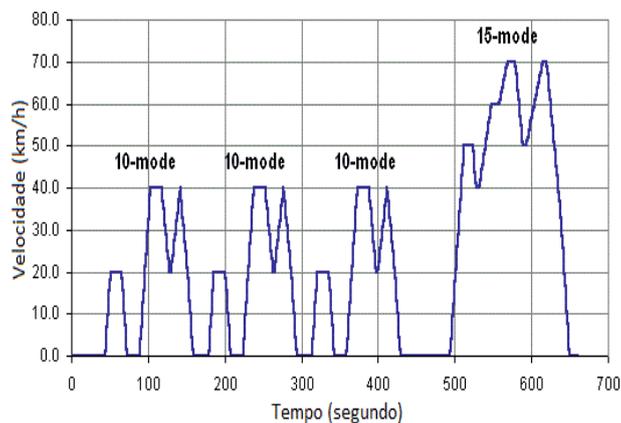
**Figura 8 - Ciclo ECE-15**

Já o ciclo europeu (Figura 8):

Possui períodos de aceleração e velocidades constantes;

É muito usado para testes de rendimento de pequenos veículos, tais como elétricos à bateria.

Para testes de emissão de veículos elétricos (tipo híbrido) o ciclo deve ser combinado com o ciclo “extra urbano” que possui uma velocidade máxima de 120 km/h.

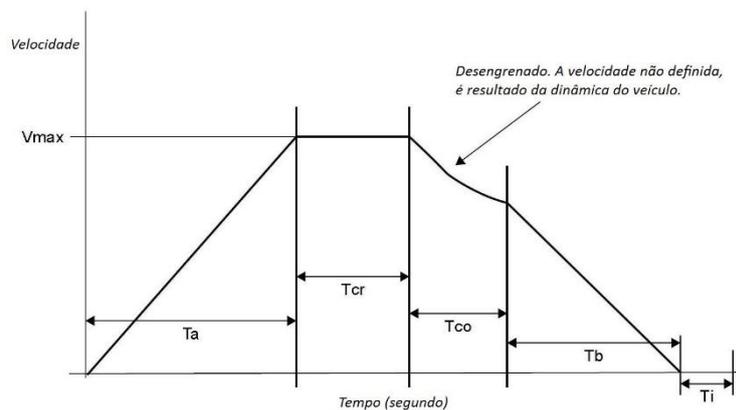


**Figura 9 - Ciclo 10-15**

Ciclo Japonês 10-15 (Figura 9) é:

Mais difundido na Ásia;

Similar ao ciclo europeu, o ciclo envolve períodos de velocidades e aceleração constante.



**Figura 10 - Ciclo SAE J227a**

Outro ciclo é o SAE J227a (Figura 10) que é:

Ciclo bastante antigo ( $\approx 1970$ ) e

Existem 04 versões (com velocidades diferentes).

É composto pelas seguintes fases:

Aceleração;

Velocidade constante;

Desengrenado (“banguela”);

Frenagem;

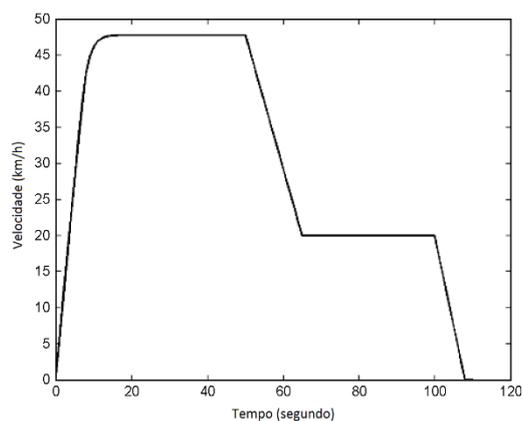
Tempo estacionado.

Os ciclos A e B (tabela) são úteis para teste de veículos de entregas.

**Tabela 2 - Tempos do Ciclo ECE-47 (Adaptado de Larminie et al., 2003)**

Parâmetro	Unidade	Ciclo A	Ciclo B	Ciclo C	Ciclo D
$V_{m\acute{a}xima}$	Km/h	16	32	48	72
$T_{aceleração}$	s	4	19	18	28
$T_{curso}$	s	0	19	20	50
$T_{desengrenado}$	s	2	4	8	10

$T_{frenagem}$	s	3	5	9	9
$T_{parado}$	s	30	25	25	25
$T_{TOTAL}$	s	39	72	80	122



**Figura 11 - Ciclo ECE-47**

Por fim, podemos citar o ciclo ECE-47 (Figura 11). Este ciclo é:

Usado para teste de emissão de veículos equipados com motor com cilindrada inferior a 50 cm<sup>3</sup>;

Largamente utilizado para teste de *scooters* elétricas e

Testa-se a aceleração máxima durante 50s, a frenagem até 20 km/h e o cruzeiro nesta velocidade durante 35s.

## PROGRAMA

Algoritmo utilizado na simulação do programa deste artigo é apresentado na Figura 12.

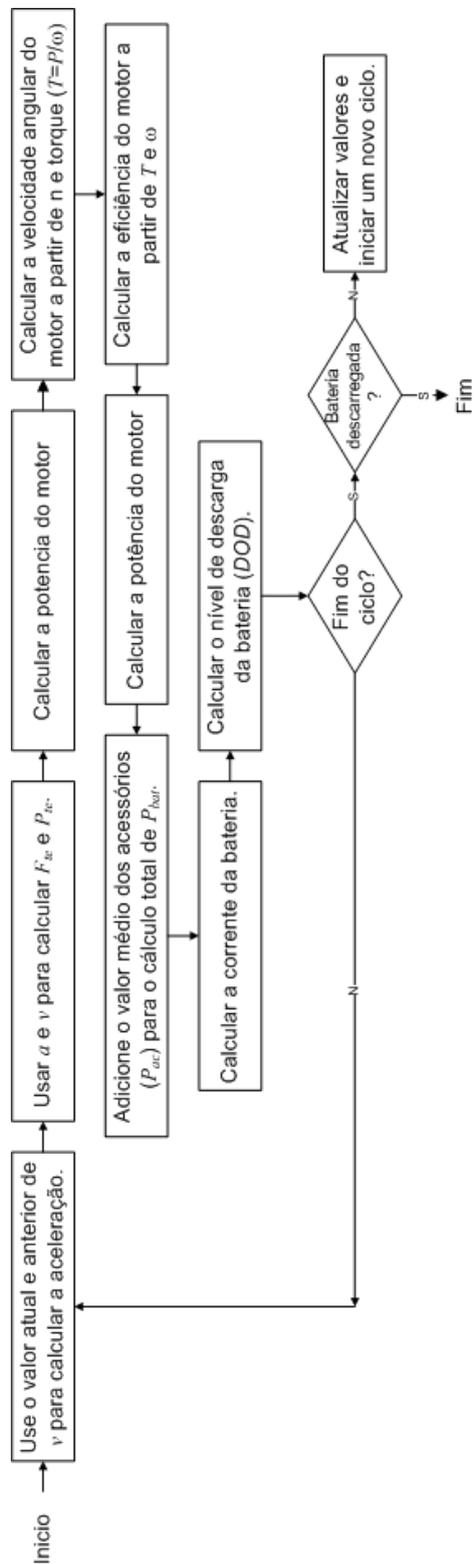
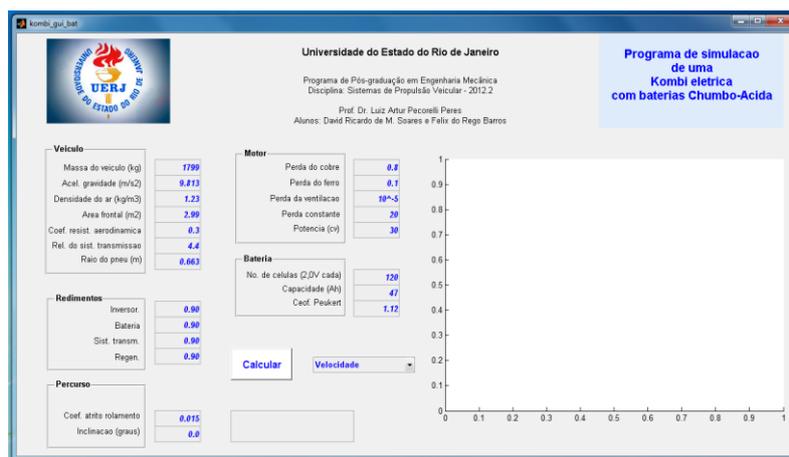


Figura 12 - Algoritmo do programa de simulação de um veículo elétrico

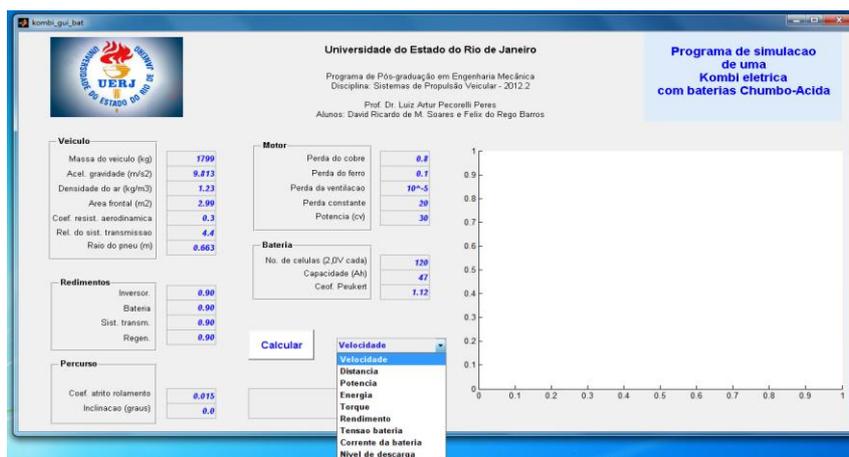
O programa possui duas versões, uma mais amigável, utilizando a ferramenta GUI (*Graphics User Interface*) do Matlab e outra, mais simples, sem qualquer recurso gráfico na interface com o usuário.

Na opção com interface gráfica, o usuário insere os dados diretamente nos campos (em azul) seguido de <Enter> e, em seguida, seleciona a opção **Calcular** para o programa efetuar os cálculos (Figura 13).



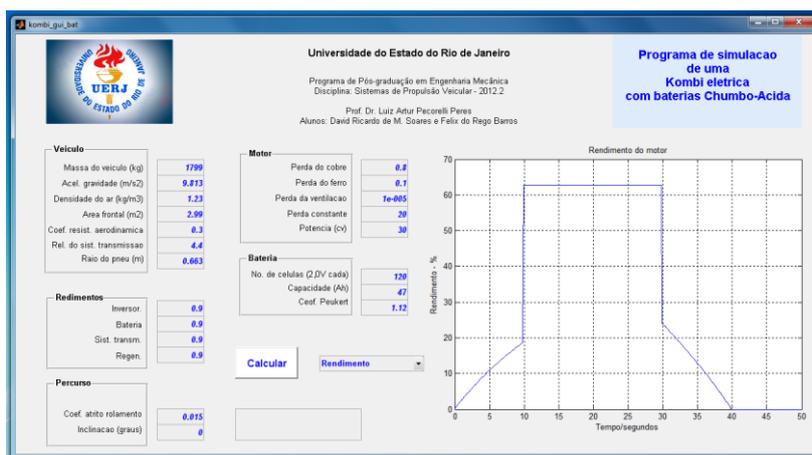
**Figura 13 - Interface GUI do Matlab**

Em seguida, o usuário escolhe os diversos tipos de gráficos disponíveis no programa (Figura 14).



**Figura 14 - Opções disponíveis no programa**

E o gráfico é apresentado (Figura 15).



**Figura 15 - Exemplo de gráfico (Rendimento)**

Nesta outra opção de programa a interface é mais simples (Figura 16).

```

Command Window
New to MATLAB? Watch this Video, see Demos, or read Getting Started.

- - - Universidade do Estado do Rio de Janeiro - UERJ - - -

Programa de Pos-graduacao em Engenharia Mecanica

Disciplina: Sistemas de Propulsao Veicular - 2012.2
Prof. Dr. Luiz Artur Pecorelli Peres
Alunos: David Ricardo de M. Soares e Felix do Rego Barros

Simulador de um veiculo eletrico operado com baterias Chumbo-Acida

- - - Veiculo - - -
(01) Massa (kg): 1799
(02) Acel. grav (m/s²): 9.813
(03) Densidade do ar (kg/m³): 1.23
(04) Area frontal (m²): 2.99
(05) Coef. resist. aerodinamica: 0.3
(06) Rel. do sist. transmissao: 4.4
(07) Diametro do pneu (m): 0.663

- - - Motor - - -
(08) Perda do cobre: 0.1
(09) Perda no ferro: 0.1
(10) Perda por atrito: 1.0e-005
(11) Perda constante: 20
(12) Potencia (cv): 30

- - - Rendimentos - - -
(13) Inversor: 0.9
(14) Bateria: 0.9
(15) Sist. transmissao: 0.9
(16) Sist. regenerativo: 0.9

- - - Bateria - - -
(17) No de celulas (2,0V cada): 120
(18) Capacidade (Ah): 47
(19) Coef. Peukert: 1.12

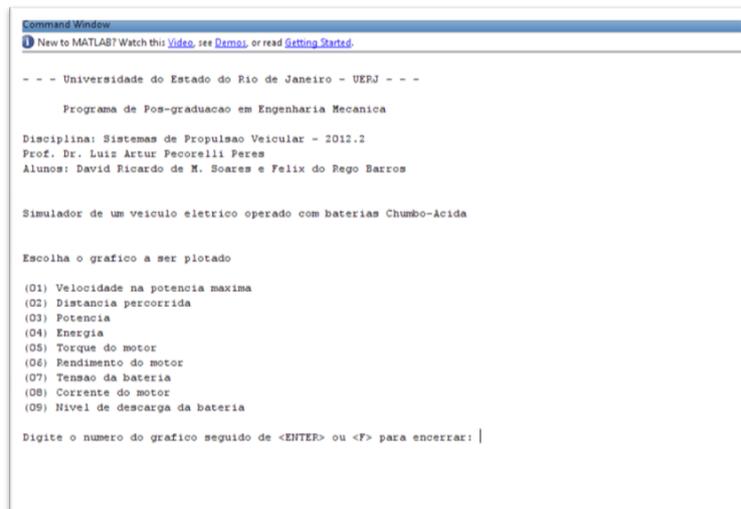
- - - Percurso - - -
(20) Coef. atrito rolamento: 0.015
(21) Inclinaçao (graus): 0

Digite o numero do item que deseja alterar seguido de <ENTER> ou <C> para calcular:

```

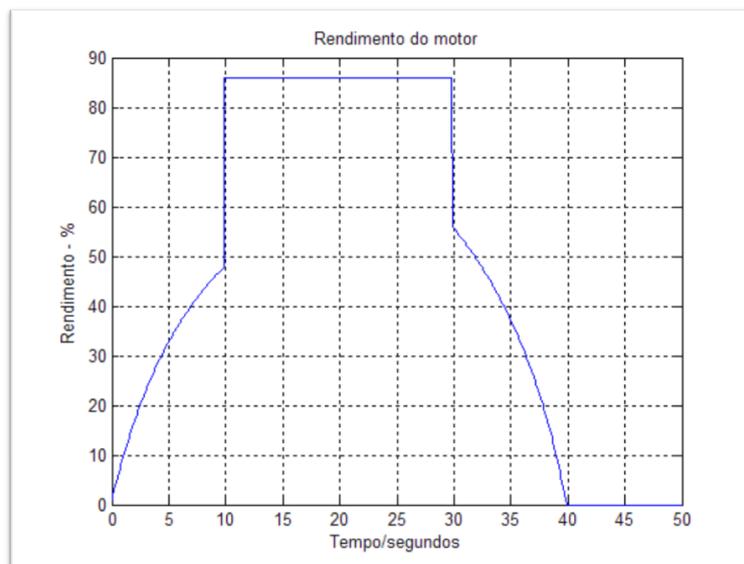
**Figura 16 - Interface com usuário (versão simplificada)**

O usuário escolhe a opção que deseja alterar o valor (seguido de <enter>) e digita o valor desejado. Quando terminar de inserir todos os valores, o usuário digita C ou c e passa para a tela com a opção dos gráficos (Figura 17).



**Figura 17 - Tela de escolha do gráfico (versão simplificada)**

Escolhendo a mesma opção do exemplo anterior – rendimento do motor (Figura 18).



**Figura 18 - Apresentação do gráfico (versão simplificada)**

O gráfico aparece num menu tipo *pop up* que pode ser editado, copiado e inserido num arquivo de texto.

## VALIDAÇÃO E RESULTADOS

Como um primeiro exemplo de aplicação será apresentado o tempo para uma *scooter* sair do repouso e atingir uma dada velocidade, com o ângulo da rampa ( $\psi$ ) = 0°. Para isso será utilizada a Equação (13) que, na forma diferencial, fica com o aspecto da Equação (14).

$$F_{te} = \mu_{rr}.m.g + 0,625.A.C_d.v^2 + m.a + I \frac{G^2}{\eta_g r^2} a \quad (13)$$

$$\frac{G}{r} T = \mu_{rr}.m.g + 0,625.A.C_d.v^2 + \left( m + I \frac{G^2}{\eta_g r^2} \right) \frac{dv}{dt} \quad (14)$$

A *scooter* possui as seguintes características:

A massa da *scooter* com um passageiro típico de 70 kg  $\Rightarrow m = 185$  kg;

O momento de inércia do motor é desconhecido. Será utilizada a aproximação de +5% na massa da *scooter*  $\Rightarrow m = 194$ kg;

$C_d$  será estimado em 0,75;

A área frontal ( $A$ ) da *scooter* (com o passageiro) será de 0,6m<sup>2</sup>;

O coeficiente de resistência a rolagem (pneus + rolamentos)  $\Rightarrow \mu_{rr \text{ total}} = 0,007$ ;

O motor é conectado ao pneu ( $\varnothing = 42$  cm) do eixo dianteiro através de um sistema de tração com de razão 2:1. Assim  $G = 2$  e  $r = 21$  cm;

A eficiência sistema de tração é  $\eta_g \approx 0,98$ .

O motor é do tipo Lynch de 18 volts, cujo torque é dado por:

$$T = 153 - 1,16.\omega \quad (15)$$

A corrente máxima é limitada a 250A, fazendo com que  $T_{máx} = 34Nm$  e a rotação crítica ( $\omega_c$ ), a partir da qual o torque cai, é dada por:

$$34 = 153 - 1,16\omega_c$$

$$\therefore \omega_c = \frac{153 - 34}{1,16} = 103 \text{ rad.s}^{-1} \approx 1.000 \text{ rpm}$$

Assim, para  $\omega \leq \omega_c$ , o movimento é regido por:

$$\frac{dv}{dt} = 1,57 - 0,00145v^2$$

Ou

$$v_{n+1} = v_n + \partial t \cdot (1,57 - 0,00145v_n^2)$$

Que no *Matlab*<sup>®</sup> é escrito como:

$$v(n+1) = v(n) + dt * (1.57 - 0.00145 * v(n)^2)$$

E, para  $\omega > \omega_c$ , o movimento é regido por:

$$\frac{dv}{dt} = 7,30 - 0,52v - 0,00145v^2$$

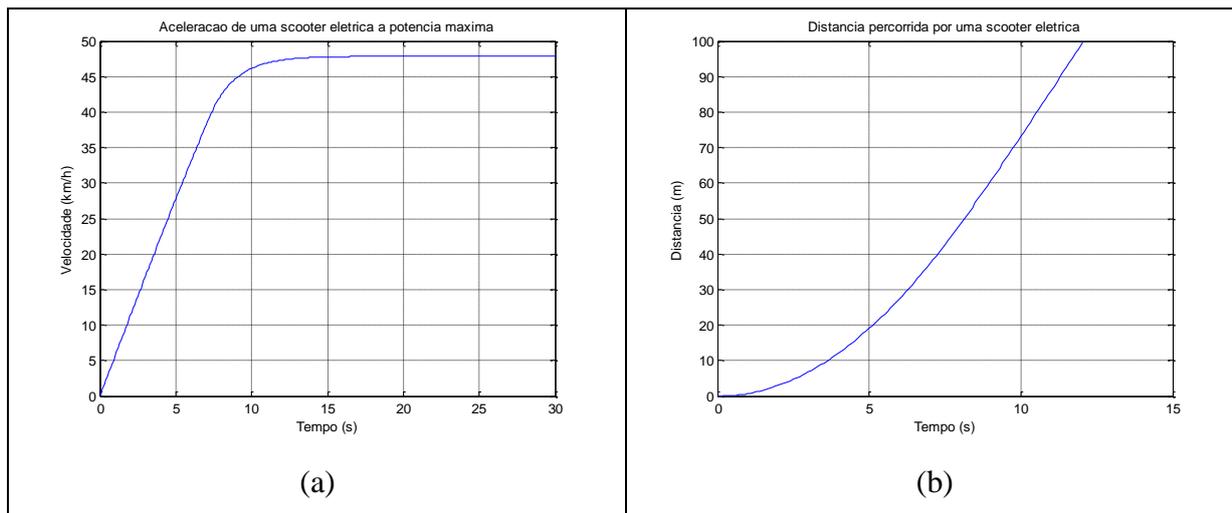
Ou

$$v_{n+1} = v_n + \partial t \cdot (7,30 - 0,53v_n - 0,00145v_n^2)$$

Que no *Matlab*<sup>®</sup> fica:

$$v(n+1) = v(n) + dt * (7.3 - 0.53 * v(n) - 0.00145 * v(n)^2)$$

Os resultados obtidos na simulação estão na Figura 19.



**Figura 19 - Resposta do programa para a velocidade (a) e distância (b).**

Estes resultados coincidem com os apresentados em Larminie, 1993.

Um segundo teste foi realizado, agora com os valores do veículo elétrico comercial EV1 da GM, no qual foram utilizados os seguintes parâmetros:

Massa do veículo (com motorista e um passageiro) –  $m = 1.540\text{kg}$ ;

Massa do veículo (com momento de inércia) –  $m = 1.560\text{kg}$ ;

Razão do sistema de tração –  $G = 11$ ;

Raio do pneu –  $r = 0,30\text{m}$ ;

Torque máximo –  $T_{max} = 140\text{Nm}$ ;

$\omega_c = 733 \text{ 1/s}$ ;

$T = T_{max}$  até  $v = 19,8\text{m/s} = 71,3 \text{ km/h}$ ;

Acima de  $19,8\text{m/s}$  –  $P = c^{te} = 102\text{kW}$ ;

$$T = \frac{2756}{v}$$

Área frontal –  $A = 1,8\text{m}^2$ ;

Eficiência sistema de tração –  $\eta_g = 0,95$ .

Fase com Toque constante:

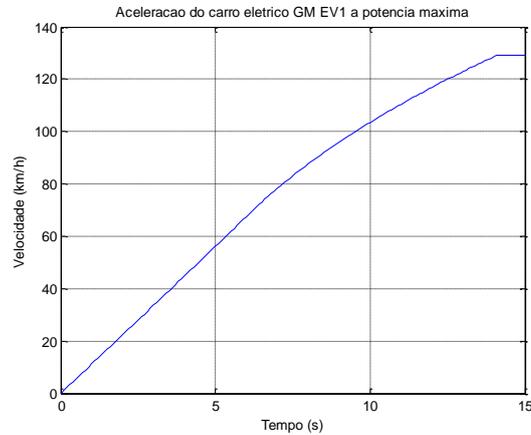
$$\frac{dv}{dt} = 3,11 - 0,000137v^2$$

$$v_{n+1} = v_n + \partial t \cdot (3,11 - 0,000137v_n^2)$$

Fase com Potência constante:

$$\frac{dv}{dt} = \frac{62,1}{v} - 0,046 - 0,000137v^2 \quad v_{n+1} = v_n + \partial t \cdot \left( \frac{62,1}{v_n} - 0,046 - 0,000137v_n^2 \right)$$

O resultado é apresentado na Figura 20.



**Figura 20 - Resposta do programa - Velocidade para o GM EV1**

Finalmente, como terceiro teste, foi realizada uma simulação utilizando os valores retirados dos levantamentos realizados numa Kombi elétrica convertida [Pecorelli, 2007]. Estes valores estão apresentados abaixo.

Massa do veículo (com motorista e um passageiro) –  $m = 1.799 \text{ kg}$ ;

Massa do veículo (com momento de inércia) –  $m = 1.799 \text{ kg} + 5\%$ ;

Razão do sistema de tração –  $G = 11$ ;

Raio do pneu –  $r = 0,30\text{m}$ ;

Torque máximo –  $T_{max} = 140\text{Nm}$ ;

$\omega_c = 733 \text{ 1/s}$ ;

$T = T_{max}$  até  $v = 19,8\text{m/s} = 71,3 \text{ km/h}$ ;

Acima de  $19,8\text{m/s}$  –  $P = c^{te} = 102\text{kW}$ ;

$$T = \frac{2756}{v}$$

Área frontal –  $A = 2,99 \text{ m}^2$ ;

Eficiência sistema de tração –  $\eta_g = 0,9$ .

Fase com Toque constante:

$$\frac{dv}{dt} = 3,11 - 0,000137v^2$$

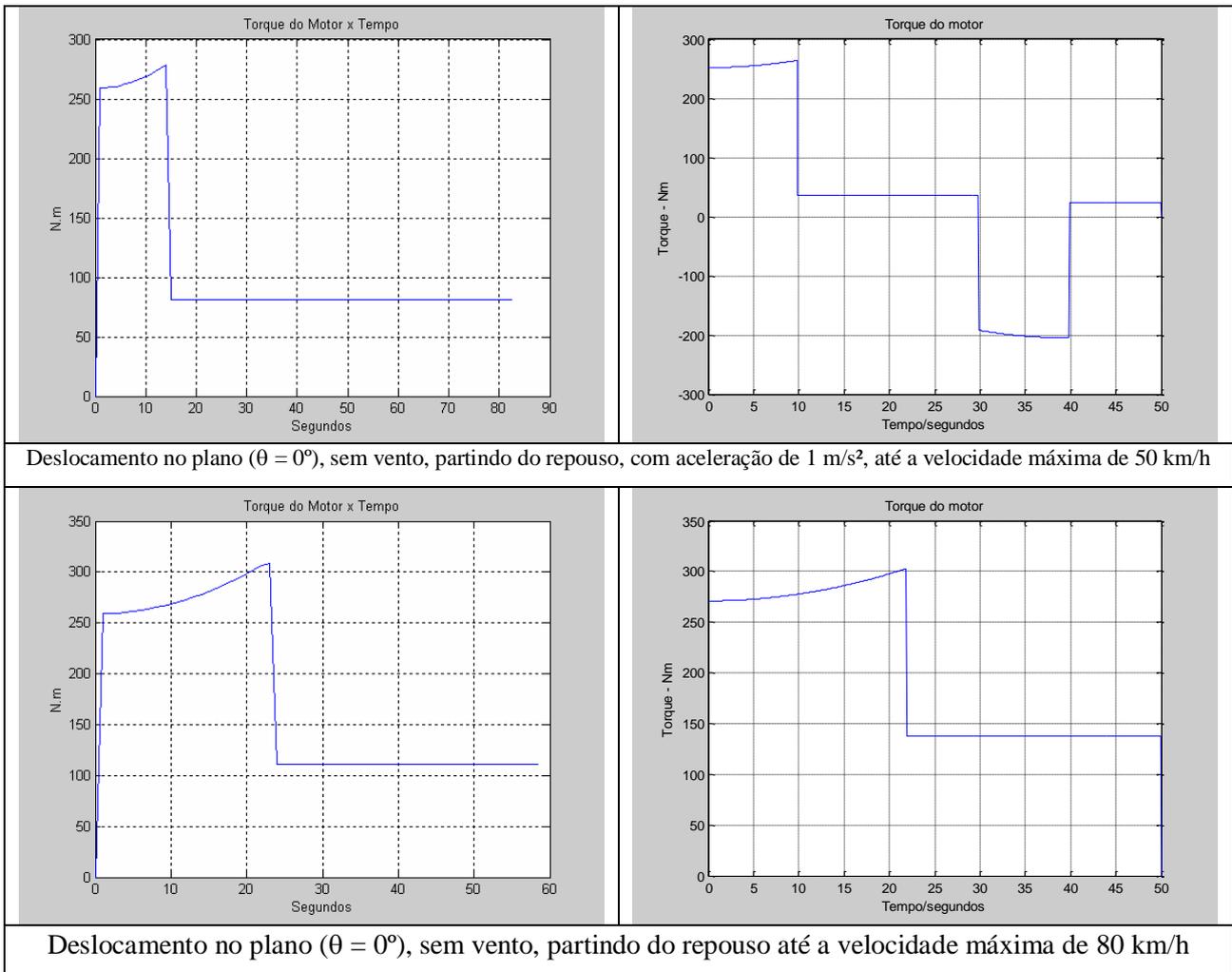
$$v_{n+1} = v_n + \partial t \cdot (3,11 - 0,000137v_n^2)$$

Fase com Potência constante:

$$\frac{dv}{dt} = \frac{62,1}{v} - 0,046 - 0,000137v^2$$

$$v_{n+1} = v_n + \partial t \cdot \left( \frac{62,1}{v_n} - 0,046 - 0,000137v_n^2 \right)$$

Para facilitar a comparação, os gráficos resultantes deste programa e de Pecorelli [2007] foram colocados lado a lado na Figura 21 Figura 1.



**Figura 21 - Gráficos de Pecorelli [2007] (lado esquerdo) e gerados pelo programa (lado direito)**

## CONCLUSÕES

Além da finalidade educativa deste desenvolvimento verifica-se que este aplicativo conseguiu resultados coerentes com aqueles encontrados nos ensaios de campo da referência bibliográfica (Peccorelli et al., 2007).

Observa-se também que o grau de exatidão dos resultados é consequência da confiabilidade dos parâmetros introduzidos nos campos de entrada, principalmente no que tange ao emprego da equação (12). Isto que exige do usuário uma análise apurada dos componentes do veículo antes do uso do aplicativo. Observa-se, que a segunda comparação houve também coerência dos resultados apesar do texto tomado como referência não ter usado a equação (12). Além disto, após um levantamento mais detalhado dos dados de entrada visto que não havia sido considerado um ângulo de inclinação de  $3^\circ$ , que de início passou despercebido mas posteriormente confirmado.

Pode-se constatar que a estrutura modular do programa permite que o usuário possa adequar cada etapa da simulação às características específicas de cada análise.

O programa também possui um campo de mensagens de alerta para avisar ao usuário, como por exemplo, que a bateria ficará sem carga antes do fim do percurso, o qual poderá ser programado pelo usuário, conforme o exemplo, com o valor compatível com o tipo de bateria que for objeto do estudo.

Por fim, pode-se ver também que os gráficos introduzidos são apenas alguns dos possíveis, já que todas as grandezas físicas são representadas por matrizes, possibilitando uma grande variedade de gráficos, tais como forças de tração pelo tempo (ou pelo deslocamento), força de arrasto pelo tempo (ou pela velocidade), etc.

Resultados dos estudos deste aplicativo podem nortear o projetista na conversão de veículo à combustão interna para tração elétrica, já que, atualmente, é uma forma mais acessível de dispor de um veículo deste tipo, uma vez que, no Brasil, o IPI para aquisição de veículos elétricos (não poluentes) é injusta e exorbitante e fica na faixa de 25%.

Como trabalho futuro pode-se sugerir a análise e alarme de situações aonde a potência instantânea necessária para à movimentação do veículo elétrico supere o torque máximo ou a potência máxima do motor elétrico, observando que este pode operar em regime de sobrecarga por um curto período de tempo e que o fator determinante deste regime é a temperatura do referido motor.

## **Agradecimentos**

Os autores manifestam seus agradecimentos à Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, à Ampla Energia e Serviços S.A., em especial aos seus gestores Weules Correia, Renato Rosa, Victor Gomes e Flavio Soares pelo apoio para a apresentação deste trabalho.

## **REFERÊNCIAS**

Larminie, J., et al., 2003. *Electric Vehicle Technology Explained*, Ed. John Wiley & Sons, Ltd, Oxford, UK, ISBN 0-470-85163-5.

Bottura, Celso P.; Barreto, Gilmar., 1989, *Veículos elétricos*; 1ª Ed, Campinas, Unicamp,

Pecorelli, L A P, Costa, W, 2007, *Análise e estudos da conversão de uma Kombi para tração elétrica*, VE 2007-5º Seminário e Exposição de Veículos Elétricos à Bateria, Híbridos e de Células de combustível, Centro Cultura Light, Rio de Janeiro

Pecorelli Peres, L. A., Pessanha, José Francisco; M, Serra, J. Vitor, Particelli, Fernanda Et Caldas, Ana. *Analysis of the Use of Electric Vehicles by Electric Utility Companies Fleet in Brazil*. *Revista IEEE América Latina.* , v.9, p.1032 - 1039, 2011

Pecorelli Peres, L. A., Costa, W., Rodrigues, L. C. R. *Níveis Quantitativos de Eficiência e Emissões de Sistemas de Propulsão Veicular In: IV Congresso Brasileiro de Eficiência Energética*, 2011, Juiz de Fora, MG. *IV Congresso Brasileiro de Eficiência Energética.* , 2011

Pessanha, J. F. M., Pecorelli Peres, L. A., F. M. F. Particelli et al. *Cenários para o Mercado de Veículos Elétricos na Cidade do Rio de Janeiro In: IV Congresso Brasileiro de Eficiência Energética*, 2011, Juiz de Fora, MG *IV Congresso Brasileiro de Eficiência Energética.* , 2011

Pecorelli Peres, L. A., Pessanha, J. F. M., Barreto, A. et al. *Estudos realizados para o estabelecimento de metodologia de análise e avaliação de desempenho de veículos elétricos*. *Revista Pesquisa e Desenvolvimento da ANEEL.* , v.3, p.66 - 67, 2009