

Eficiência energética de um veículo elétrico

Gabriel O F Briguiet, João P Q Caldas, Lucas A G Lima, Vitor Santoro Santiago*

Instituto Militar de Engenharia

Praça General Tibúrcio, 80, 22290-270 – Rio de Janeiro – RJ – Brasil.

* santoro@ime.cb.br

RESUMO: Neste trabalho é analisada a dinâmica longitudinal de um veículo elétrico a partir de um modelo de seu trem de força, visando a determinação de parâmetros que otimizem sua eficiência energética. Para tal, é desenvolvida uma descrição analítica baseada nas leis fundamentais da física, a qual permite avaliar o desempenho energético do veículo com a utilização de ferramentas computacionais, apontando inter-relação de aspectos a serem otimizados, tal qual o perfil de velocidade a ser adotado pelo motorista do veículo.

PALAVRAS-CHAVE: Eficiência energética, veículo elétrico, dinâmica longitudinal

ABSTRACT: This paper analyzes the longitudinal dynamics of an electric vehicle from a model of its power train, aiming to obtain parameters that optimize its energy efficiency. To this end, an analytical description based on the fundamental laws of physics is developed, which allows to evaluate the vehicle energy performance using computational tools, pointing out the interrelationship of aspects to be optimized, such as the speed profile to be adopted by the driver of the vehicle.

KEYWORDS: Energetic efficiency, electric vehicle, longitudinal dynamics

1. Introdução

O desenvolvimento de projetos na área de eficiência energética é de crescente importância no século XXI, tanto no aspecto econômico quanto no ambiental. O presente artigo desenvolve um tema de grande interesse para a sociedade, oferecendo uma ferramenta para modelar a eficiência energética de um veículo elétrico, contribuindo para economia de energia e para a diminuição de poluentes.

1.1 Motivação

O artigo em tela tem como objetivo a elaboração de um projeto conceitual de um veículo elétrico, através da modelagem em diagrama

de blocos de seu sistema de propulsão e de sua dinâmica veicular longitudinal, realizando a simulação do desempenho de acordo com as equações físicas dos fenômenos envolvidos. É utilizado o software *Simulink* para a modelagem e simulação do fluxo de potência, estabelecendo uma relação de causalidade e efeito no sistema dinâmico.

O modelo desenvolvido permite analisar o consumo energético do automóvel decorrente de uma sequência de comandos pré-estabelecida. Como resultado obtém-se um perfil de velocidades a ser adotado pelo condutor, o qual otimiza o consumo de energia.

1.2 Concepção do veículo elétrico

O veículo a ser modelado foi concebido para

participar da *Shell Eco Marathon*, uma competição que avalia a eficiência energética de protótipos veiculares. A sua concepção inicial prevê que o mesmo seja tri-apoiado, com duas rodas no eixo dianteiro e uma roda traseira, com tração traseira e esterçamento dianteiro, conforme **figura 1**.

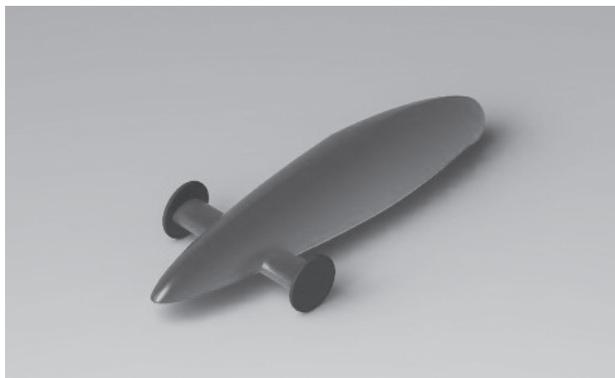


Fig. 1 – Modelo base do veículo em Solidworks

2. Modelo matemático

Para o início do trabalho, é necessária a elaboração de modelos e equações para os fenômenos físicos envolvidos no problema em estudo, tal como a dinâmica longitudinal veicular, o motor elétrico e a bateria.

2.1 Dinâmica veicular

A modelagem de um veículo requer primeiramente uma equação para a força trativa a ser empregada, tal que esta força satisfaça as seguintes condições: superar a força de resistência ao rolamento; superar a força de resistência aerodinâmica; prover a força necessária para vencer a componente da força peso que age paralela a um aclone; fornecer aceleração ao veículo quando necessário; e fornecer o torque necessário de operação aos componentes rotativos [1]. Para a-

tender aos requisitos de projeto, o veículo deve ter condições de superar as forças resistivas presentes.

2.1.1 Forças resistivas

A ação de forças resistivas ao movimento devem ser definidas e explicitadas. Para tal, as forças envolvidas e seus equacionamentos correspondentes são baseados em um veículo de massa m , a uma velocidade v , submetido a aceleração local da gravidade g e subindo uma rampa de ângulo θ com a horizontal. Tais forças são retratadas na **figura 2**, como se segue.

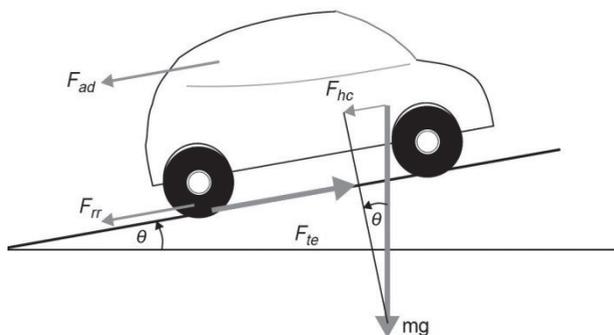


Fig. 2 – Forças atuantes no veículo [1] - adaptada

Força de resistência ao rolamento

A resistência ao rolamento é ocasionada, principalmente, pela deformação dos pneus, sendo considerada aproximadamente constante para baixas velocidades, e proporcional à força normal nas rodas do veículo, com se segue:

$$F_{rr} = \mu_{rr} mg \cos\theta \quad (1)$$

onde μ_{rr} é o coeficiente de resistência ao rolamento, o qual pode ser considerado como constante para o caso em estudo pelo fato do veículo não atingir altas velocidades [2, 3].

Força de arrasto aerodinâmico

A força de arrasto aerodinâmico é resultado da resistência, de origem viscosa e de pressão, imposta enquanto o veículo atravessa o ar; ela é função da área frontal, forma externa, condições do ar e velocidade do veículo. Sua determinação, desprezando-se os efeitos viscosos, pode ser realizada por:

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

onde ρ é a densidade do ar local, A é a área frontal, v é a velocidade e C_d é o coeficiente de arrasto, que depende do formato do corpo e o número de Reynolds correspondente.

Força de resistência à subida de rampa

A força necessária para a subida de uma rampa é definida pela componente da força peso que age ao longo do percurso, paralelamente à rampa, e é calculada por:

$$F_{hc} = mg \sin \theta \quad (3)$$

Força de aceleração

Para o caso de variação na velocidade do veículo, uma força para gerar uma aceleração linear é necessária. Seu cálculo, proveniente da segunda lei de Newton, é dado por:

$$F_{ad} = ma \quad (4)$$

onde a é a aceleração linear do veículo. No entanto, os componentes rotativos também devem ser acelerados, tal que a força para gerar aceleração angular para cada componente deve ser considerada e é relevante em veículos leves [4]. Essas for-

ças podem ser refinadas e expressas por:

$$F_{\omega am} = I_m \frac{G^2}{\eta_g r^2} a \quad (5)$$

$$F_{\omega a \omega} = I_\omega \frac{1}{r^2} a \quad (6)$$

onde I_m é o momento de inércia do rotor do motor, G é a razão de transmissão do motor, η_g é o rendimento do sistema de transmissão, r é o raio da roda, I_ω o momento de inércia das rodas.

Por fim, a força de aceleração será uma composição das forças citadas acima, tal que:

$$F_{ta} = ma + I_m \frac{G^2}{\eta_g r^2} a + I_\omega \frac{1}{r^2} a \quad (7)$$

2.1.2 Esforço trativo

Uma vez estabelecidas as forças resistivas, é necessário determinar o esforço trativo necessário para que ocorra o movimento desejado [5]. O esforço trativo em cada instante é a soma de todas as forças apresentadas anteriormente, tal que:

$$F_{te} = F_{rr} + F_{ad} + F_{hc} + F_{ta} \quad (8)$$

onde F_{rr} é a força de resistência ao rolamento, expressa pela equação (1), F_{ad} é a força de arrasto aerodinâmico, expressa pela equação (2), F_{hc} é a força de resistência à rampa, expressa pela equação (3) e F_{ta} é a força de aceleração, expressa pela equação (7).

Expandindo os termos e estabelecendo a relação diferencial, temos

$$\frac{G}{r} T = \mu_{rr} mg \cos \theta + \frac{1}{2} \rho A C_d v^2 + mg \sin \theta + \left(m + I_m \frac{G^2}{\eta_g r^2} + I_\omega \frac{1}{r^2} \right) \frac{dv}{dt} \quad (9)$$

onde T é o torque desenvolvido pelo motor elétrico em um dado instante.

2.2 Motor elétrico BLDC

2.2.1 Princípios básicos

O motor elétrico é responsável por converter energia elétrica em energia mecânica, sendo a única fonte de propulsão em um veículo elétrico. O motor comutável com controlador, corrente contínua e sem escovas, comumente conhecido como BLDC, foi escolhido para a aplicação neste trabalho por apresentar as seguintes vantagens: provém alto torque em baixas velocidades, elevada potência instantânea, torque com menos oscilações e anomalias, controle mais simples do que nos motores de indução e maior eficiência do que seu correspondente com escovas [5].

O motor sem escovas BLDC é composto, basicamente, por um rotor e um estator. Seu rotor é um ímã permanente, enquanto que o estator é envolto por uma bobina. A corrente que flui através da bobina estabelece um campo magnético. A interação entre esse campo magnético induzido no estator e o campo magnético do ímã do rotor produz uma força magnética que produz o torque. Para que a força magnética esteja sempre no mesmo sentido da rotação desejada, é necessário um circuito para inverter a polaridade do estator, conforme ilustrado na **figura 3**.

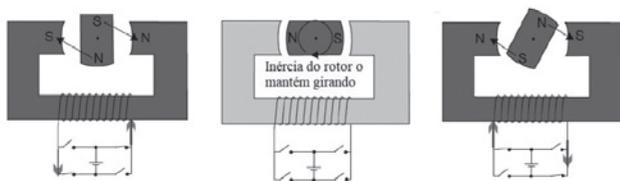


Fig. 3 – Funcionamento do motor BLDC [1] - adaptada

Comparativamente, no motor com escovas, o rotor recebe a corrente elétrica, enquanto que o estator é permanentemente imantado. Nesse caso, as escovas fazem, mecanicamente, o papel de inverter a polaridade, ocasionando uma perda de eficiência por conta do atrito. A potência mecânica fornecida pelo motor ao veículo é função do torque produzido ($N.m$) e de sua velocidade angular (rad/s), de modo que:

$$P_{mec} = T\omega_m \quad (10)$$

Por outro lado, a potência elétrica fornecida ao motor elétrico é função da voltagem a ele alimentada e da corrente elétrica que o atravessa, de modo que:

$$P_{ele} = V_t I_s \quad (11)$$

2.2.2 Análise de desempenho

A análise de um motor BLDC será baseada nas hipóteses de motor não saturado. As resistências, indutâncias e auto-indutâncias dos enrolamentos do estator são iguais, os semicondutores de potência empregados no inversor são ideais e perdas de ferro desprezíveis [6].

Um circuito simplificado de fase única é apresentado na **figura 4**. Nele, V_t é a voltagem da fonte de alimentação, R_s é a resistência do enrolamento, L_s é a indutância do enrolamento e E_s é a força contra-eletromotriz induzida no circuito devido à rotação do rotor.

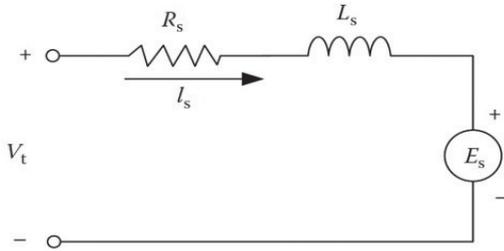


Fig. 4 – Circuito simplificado de fase única [6] - Adaptada

Baseando-se no circuito equivalente apresentado para o motor BLDC, extraem-se as equações 12 a 15:

$$V_t = R_s I_s + L_s \frac{dI_s}{dt} + E_s \quad (12)$$

$$E_s = k_E \omega_r \quad (13)$$

$$T_e = k_T I_s \quad (14)$$

$$T_e = T_L + J \frac{d\omega_r}{dt} + B \omega_r \quad (15)$$

onde k_E é a constante da força contraeletromotriz, ω_r é a velocidade angular do rotor, k_T é a constante de torque, T_L é o torque resistivo, T_e é o torque fornecido pelo motor, B é o coeficiente de resistência viscosa, L_s é a indutância do enrolamento e J é o momento de inércia do rotor [6, 7].

Visando obter equações algébricas que permitam o controle do motor BLDC, aplica-se a Transformada de Laplace nas equações diferenciais 12 a 15 chegando-se a:

$$V_t(s) = (R_s + sL_s)I_s + E_s \quad (16)$$

$$E_s(s) = k_E \omega_r(s) \quad (17)$$

$$T_e(s) = k_T I_s(s) \quad (18)$$

$$T_e(s) = T_L(s) + (B + sJ)\omega_r(s) \quad (19)$$

O interesse maior para a dinâmica veicular reside em uma análise do torque líquido produzido pelo motor, de modo que seja respeitada a relação da causalidade entre velocidade do veículo em função da força resultante sobre o mesmo. Logo, a função de transferência do motor pode ser dada por:

$$T_e(s) = \frac{k_T}{(R_s + sL_s)} V_t(s) - \frac{k_T k_E}{(R_s + sL_s)} \omega_r(s) \quad (20)$$

2.3 Bateria

Em um veículo elétrico, a bateria é a fonte de energia que alimenta um motor elétrico. Seu funcionamento se baseia na conversão de energia química nela armazenada em energia elétrica, por meio de reações químicas. Os principais tipos de bateria utilizados em veículos elétricos ou híbridos são chumbo-ácido, níquel-cádmio (NiCd), hidreto metálico de níquel (NiMH), íon-lítio (Liion), polímero-lítio, sódio-enxofre (NaS), e bateria zinco-ar. Cada composição química determinará uma voltagem da célula da bateria [5]. Dentre os tipos de bateria citados anteriormente, as de íon-lítio são amplamente utilizadas na propulsão de veículos elétricos como o analisado neste trabalho, por apresentar altas eficiência e energia específica. Apresentam uma voltagem de 3,6 V por célula.

Um parâmetro importante na análise de uma bateria é a sua capacidade, ou seja, a carga que ela consegue armazenar e posteriormente fornecer ao motor. Essa capacidade é usualmente especificada em ampere-hora (Ah), entretanto, a intensidade da corrente de descarga influencia em sua capacidade. Um exemplo disso é observado na **figura 5**.

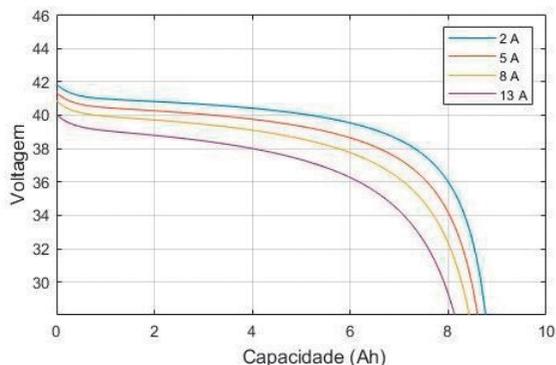


Fig. 5 – Voltagem x Capacidade (2, 5, 8 e 13 A)

Neste trabalho será analisada somente a descarga da bateria, considerando a aplicação em somente um ciclo de utilização do veículo. Estudando uma descarga da bateria a partir da carga completa, percebe-se que inicialmente o descarregamento não é linear, dando origem à denominada zona exponencial. Na **figura 6**, observa-se a diferença entre as áreas de comportamento exponencial e nominal da bateria. Após o final da área nominal, a voltagem fornecida pela bateria cai abruptamente.

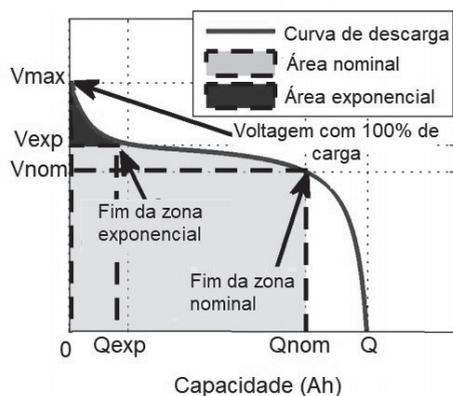


Fig. 6 – Curva de descarga da bateria sob corrente nominal [8] – Adaptada

A quantificação da energia que sai da bateria é feita através da potência elétrica solicitada, que

depende da potência mecânica requerida pelo motor para movimentar o veículo.

$$E = \int P_{ele} dt \quad (21)$$

Para que a bateria não se descarregue por completo, deve-se monitorar o estado de carga (SoC, “State of Charge”), o qual relaciona a carga restante na bateria com a carga total (Q), considerando-se uma corrente de descarga $i(t)$. Ele é calculado como se segue:

$$SoC = 100 \left(1 - \frac{1}{Q} \int_0^t i(t) dt \right) \quad (22)$$

3. Modelo numérico

Diagramas de blocos constituem uma maneira de retratar sistemas dinâmicos, proporcionando uma compreensão facilitada destes frente às respectivas representações puramente matemáticas. Através da representação característica dos componentes de um sistema dinâmico e suas funções associadas, os diagramas de bloco permitem observar com maior clareza o fluxo de sinais em um sistema real [9]. Para sistemas complexos, a concepção em diagrama de blocos esclarece o entendimento do fenômeno físico, elucidando os efeitos de cada entrada no sistema. Por esta razão, este foi o método selecionado para fazer a análise de desempenho do veículo elétrico em estudo. Nesse contexto, utilizou-se o *Simulink* (versão R2018a) para modelar cada componente de interesse e computar diversos parâmetros para o percurso simulado.

Conforme anteriormente descrito, o veículo deve superar as forças de resistência ao movimento, de modo a atingir a aceleração e velocidade almejadas. Dado que o percurso a ser percorrido pelo veículo

na competição *Shell Eco Marathon* ocorrerá em asfalto nivelado, o ângulo de rampa atribuído será de 0° .

3.1 Modelagem da dinâmica veicular

A dinâmica veicular será resultado das forças resistivas previamente elencadas e da aceleração demandada pelo piloto através do perfil de velocidade desejado. No âmbito desta simulação, a aceleração será uma entrada para o bloco de dinâmica veicular, o qual calculará o somatório das forças de aceleração e de resistência ao movimento, e fornecerá a força trativa necessária F_{te} para se obter o desempenho pretendido. A **figura 7** exibe o esquema do bloco em questão.

3.2 Modelagem do motor elétrico

Para o emprego do modelo do motor elétrico na dinâmica veicular é necessário que o motor forneça um torque líquido para uma dada velocidade do veículo. Desse modo, é possível calcular a aceleração instantânea do automóvel, permitindo o cálculo da nova velocidade do veículo, realimentando o subsistema do motor com a velocidade real do carro. A equação 20 permite

calcular o torque fornecido pelo motor elétrico submetido a uma voltagem V_l e velocidade w_r . A **figura 8** apresenta o diagrama de blocos para controle do motor elétrico BLDC.

3.3 Modelagem da bateria

A fim de simular o comportamento da bateria ao longo do tempo de funcionamento do veículo, utilizou-se o modelo de bateria de íon-lítio da biblioteca elétrica do *Simscape*, onde a voltagem da bateria é determinada por:

$$V_{batt} = E_o - R \cdot i - \frac{Q}{Q - it} \cdot i^* - k \cdot \frac{Q}{Q - it} \cdot it + A \cdot e^{-B \cdot it} \quad (23)$$

onde E_o é a voltagem de circuito aberto da bateria, Q é a capacidade em Ah , K é a constante de polarização, R a resistência interna da bateria, $it = \int i \cdot dt$ é a carga total retirada da bateria, i é uma corrente filtrada, que passa pela resistência de polarização. Os parâmetros A e B são, respectivamente, a amplitude da zona exponencial (em volts) e uma constante de tempo da zona exponencial.

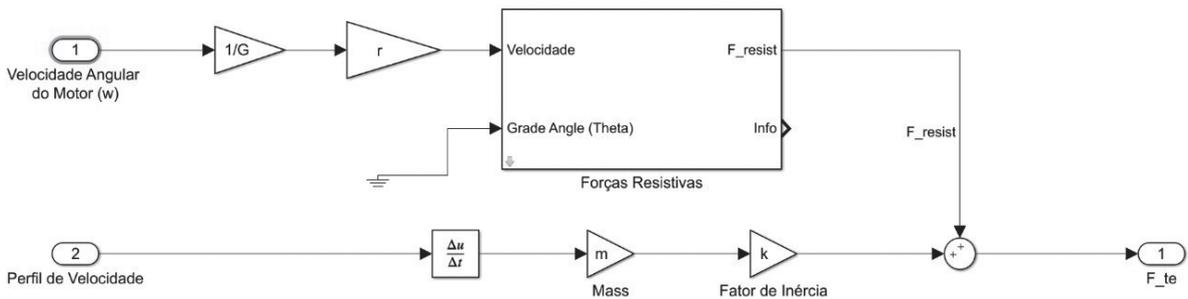


Fig. 7 – Bloco dinâmica veicular

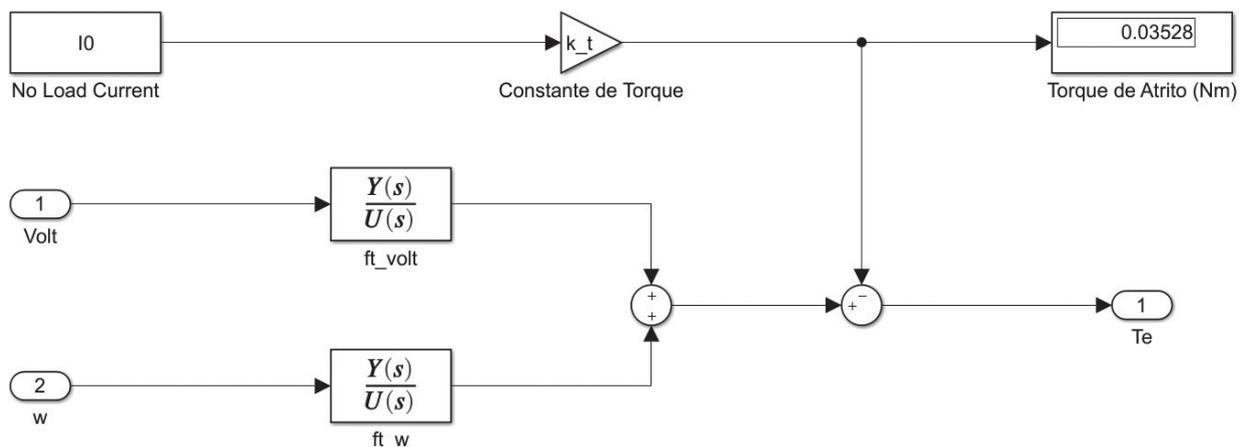


Fig. 8 – Controle motor BLDC

3.4 Obtenção de parâmetros físicos

Dinâmica veicular

Para a avaliação do coeficiente de arrasto do veículo fez-se uso da extensão *Flow Simulation* do programa *Solidworks*, partindo de um modelo CAD otimizado, baseado em uma literatura que sugere a utilização de formas da indústria aeroespacial. Em especial, o uso de perfil NACA (*National Advisory Committee for Aeronautics*) [10–12] de baixas velocidades, coeficiente de arrasto e coeficiente de sustentação, como o perfil NACA 2421, eleito como base para a vista lateral do modelo. Utilizando o modelo otimizado em CAD do veículo, um valor de C_d igual a 0,20 é obtido. A disposição da gaiola de segurança junto a geometria é apresentada na **figura 9**.

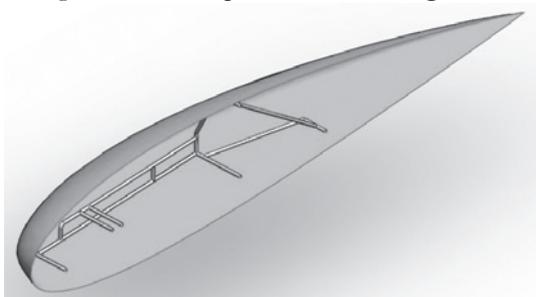


Fig. 9 – Vista em corte do modelo utilizado e gaiola e segurança (Elaborada pelos autores).

As demais especificações do veículo e condições ambientais encontram-se apresentadas na **tabela 1**. Ressalta-se ainda a estimativa do coeficiente de resistência ao rolamento, utilizando como referência valor encontrado aferido por [13]. Ademais, o valor do momento de inércia do rotor do motor elétrico é fornecido pela Fabricante [14].

Tab 1 – Parâmetros da dinâmica veicular

Parâmetro	Valor
Massa total - piloto + veículo (m)	90 kg
Aceleração da gravidade (g)	9,81 m/s ²
Ângulo de rampa (θ)	0°
Coef. resistência ao rolamento (μ_{rr})	0,002
Densidade do ar local (ρ)	1,184 kg/m ³
Área frontal efetiva (A)	0,5 m ²
Raio da roda (r)	0,25 m
Coeficiente de arrasto (C_d)	0,20
Rendimento da transmissão (η_g)	0,97
Momento de inércia do rotor (I_m)	170 g . cm ²
Relação de transmissão (G)	7
Momento de inércia das rodas (I_ω)	0,25 kg . m ²

As forças resistivas são então determinadas e apresentadas na **tabela 2**.

Tab 2 – Forças resistivas

Força	Valor
Força de resistência ao rolamento (F_r)	1,7658 N
Força de arrasto aerodinâmico (F_{ad})	0,0592 v ² .kg/m
Força de subida de nível (F_{hc})	0
Força de aceleração (F_a)	94,014 a .kg

Logo, como proposto na equação 9, o esforço trativo reduz-se à:

$$T = 1,7658 + 0,0592v^2 + 94,014 \frac{dv}{dt} \quad (24)$$

Motor elétrico

Os parâmetros físicos do motor elétrico pertinentes ao modelo descrito na seção 2.2.2 são apresentados na **tabela 3**. Todos os dados encontram-se presentes no catálogo fornecido pelo próprio fabricante [14].

Tab 3 – Parâmetros do motor elétrico

Parâmetro	Valor
Voltagem nominal (V_n)	24 V
Torque na partida - stall (T_s)	13 N.m
Torque em operação nominal (T_n)	0,428 Nm
Velocidade em operação nominal (ω_n)	4200 rpm
Velocidade sem carga (ω_0)	4680 rpm
Corrente sem carga (I_0)	0,726 A
Constante de tempo mecânica (t_m)	0,645 m.s
Const. da força contra-eletromotriz (k_E)	48,5 mV/rad/s
Constante de torque (k_T)	48,6 m N.m/A
Resistência do enrolamento (R_φ)	0,0894 Ω
Indutância do enrolamento (L_φ)	0,122 mH
Momento de inércia do rotor (J)	170 g · cm ²

Note, no entanto, que o coeficiente de atrito viscoso B , necessário para a modelagem completa do motor, conforme a seção 2.2.2, não é fornecido diretamente no catálogo. No entanto, o mesmo pode ser obtido através da constante de tempo mecânica t_m [15]:

$$t_m = \frac{R_s J + L_s B}{R_s B + k_E k_T} \quad (25)$$

O coeficiente B será, então, dado por:

$$B = \frac{R_s J - k_E k_T t_m}{R_s t_m - L_s} \Rightarrow B = 5,7 \cdot 10^{-5} (SI) \quad (26)$$

Outro valor importante a ser levado em conta é o torque de atrito, que descreve o atrito interno presente em rolamentos e no sistema de comutação do motor. Segundo o manual do motor, o torque de atrito é produzido na velocidade ω_0 , quando todo o momento gerado é utilizado para superar tal fricção. Assim:

$$T_{at} = k_T I_0 \Rightarrow T_{at} = 0,03528 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (27)$$

A bateria considerada para a simulação é do tipo íon-lítio, modelo LGDAS31865, cujos parâmetros se encontram na **tabela 4**.

Tab 4 – Características da bateria

Parâmetro	Valor
Voltagem Nominal (V_{nom})	36 V
Capacidade nominal (C)	8,8 Ah
Resistência interna (R)	0,1 Ω
Células em série	10
Conexões em paralelo	4

4. Otimização e resultados

A busca de soluções máximas ou mínimas globais é, invariavelmente, de grande interesse para engenheiros. Ademais, a busca pela máxima eficiência energética é o intuito maior deste trabalho. Num algoritmo de otimização, objetiva-se minimizar (ou maximizar) uma dada função, definida como função objetivo. Para tal, variam-se os parâmetros de otimização. É possível, então, definir dois pontos principais do algoritmo de otimização: a função objetivo e os parâmetros a serem otimizados. De modo a permitir que o veículo atinja a velocidade desejada pelo motorista, é necessário que haja o controle ativo da voltagem fornecida ao motor elétrico. O controlador eletrônico é o responsável por realizar tal ação: ele varia a voltagem fornecida de modo que a velocidade real se aproxime da velocidade requerida pelo piloto. O tipo de controlador selecionado para o presente veículo é do tipo PID: Proporcional-Integral-Derivativo. O sistema de controle, ao receber o sinal de erro entre as velocidades de referência (fornecida pelo motorista) e a velocidade instantânea do automóvel, envia um sinal de voltagem correspondente em função dos parâmetros do PID. A **figura 10** apresenta o diagrama de blocos do modelo contendo o controle PID.

É comum que haja, no sistema de controle de um veículo elétrico, tanto um controle da velocidade no período de aceleração, quanto um controle de velocidade de cruzeiro [6]. Em geral, tais sistemas são independentes. Como consequência, a introdução do controle ocorreu em duas etapas: inicialmente, desenvolveu-se o sistema de controle de velocidade em cruzeiro, situação na qual as forças inerciais (de aceleração) são desprezíveis frente às forças de arrasto aerodinâmico e de resistência ao rolamento. Posteriormente foi desenvolvida a modelagem completa, isto é, para estados distantes da condição de

equilíbrio dinâmico, envolvendo também os trechos de aceleração a partir do repouso. A condição inicial do integrador é numericamente igual à tensão nominal do motor, de modo a permitir o torque máximo na partida, com velocidade inicial nula.

4.1 Otimização do controle em cruzeiro

Os parâmetros da otimização foram os 3 ganhos do controlador (P, I e D) e o coeficiente de filtro N . A função objetivo foi construída de modo a minimizar, para uma entrada degrau unitária de velocidade, o máximo sobressinal (overshoot) e o erro entre o sinal de referência e a velocidade desenvolvida ao longo do tempo. Para tal, utilizou-se a integral quadrática de erros (ISE, do inglês Integral Square of Errors), a qual representa um bom critério de performance para um controlador. A função é dada pela equação 28:

$$I_{ISE} = \int_0^t e(t)^2 dt \quad (28)$$

A função objetivo foi, então, construída de acordo com a equação 29:

$$f_{obj} = w_1 \cdot M_p + w_2 \cdot I_{ISE} \quad (29)$$

onde M_p é o *overshoot* apresentado pelo sistema quando submetido à entrada degrau unitária. A escolha pela função objetivo descrita pela equação 29 deve-se, principalmente, pela segurança do veículo e do condutor.

Em especial, é de extrema importância proteger o circuito controlador de sobrecorrentes, advindas de potenciais saltos de velocidade e aceleração. Foi necessário limitar o espaço de busca do algoritmo de Otimização por Enxame de Partículas - PSO, de modo que apenas parâmetros positivos fossem analisados, evitando o coeficiente de filtro N negativo. Restringindo-se então o novo espaço de buscas, utilizou-se os limites expostos na **tabela 5**.

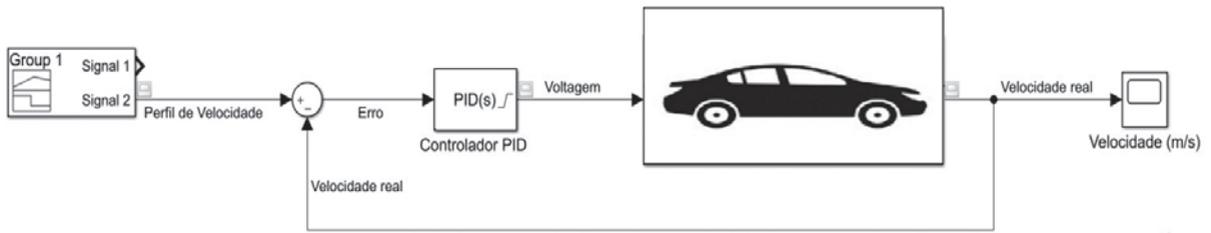


Fig. 10 – Modelo com controle PID

Tab 5 – Restrições aplicadas aos parâmetros na otimização PSO

Parâmetro	Limite superior	Limite inferior
P	0	irrestrito
I	0	irrestrito
D	0	irrestrito
N	0,00001	irrestrito

As configurações utilizadas para a nova rotina PSO encontram-se expostas na **tabela 6**.

Tab 6 – Configurações utilizadas na rotina PSO

Configuração	Valor
c_1	2
c_2	2
faixa de inércia w	0,1 a 1,1
número de indivíduos	15

A função objetivo foi construída tal que w_1 e w_2 foram ambos iguais a 1000. Como será exposto mais à frente, a escolha por tais pesos mostrou-se útil, a fim de se reduzir simultaneamente, o erro quadrático e o overshoot do sistema. Além disso, os coeficientes de aceleração c_1 e c_2 foram considerados iguais a 2. Os resultados obtidos encontram-se expostos na **tabela 7**.

Tab 7 – Parâmetros PID para velocidade de cruzeiro obtidos via PSO

Parâmetro	Valor
P	70096,0187728607
I	2346,00222480831
D	40,7327289058769
N	255819,239533505
Número de iterações	39
fobj	0,7591
flag de saída	-1

Atualizando o modelo do veículo com os valores PID obtidos por meio do PSO, presentes na **tabela 7**, analisou-se a resposta do sistema às entradas tradicionais degrau e senoidal. A **figura 11** revela que a resposta do sistema para uma entrada degrau unitário não apresenta *overshoot* perceptível.

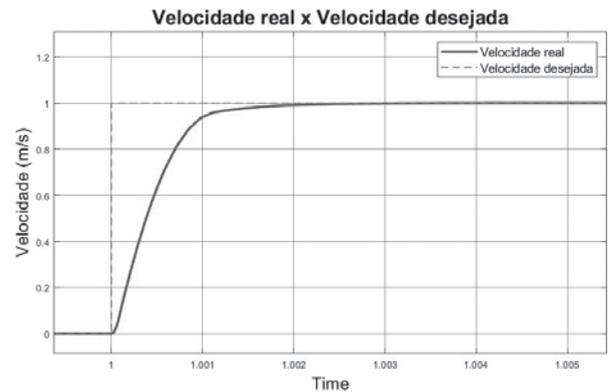


Fig. 11 – Resposta otimizada - entrada degrau unitário

Isso ocorreu sem que o tempo de acomodação ficasse elevado; ao contrário, tal parâmetro de performance ficou na ordem de 3 milissegundos (0,003 segundos), valor imperceptível para o motorista, uma vez que o tempo de reação humana está entre 0,15 e 0,45 segundos. A **figura 12** mostra os instantes iniciais do movimento para uma entrada degrau positiva de 6 m/s. Em um tempo de 5 milissegundos, o veículo atingiu a velocidade prescrita, novamente sem *overshoot*.

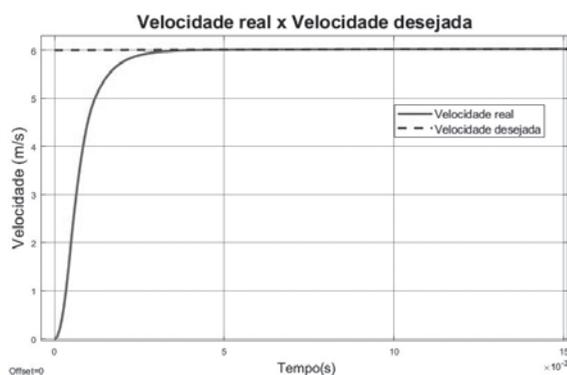


Fig. 12 – Resposta otimizada - entrada degrau 6m/s

Simulou-se, então, o comportamento do veículo para uma entrada senoidal positiva de 6 m/s, conforme mostrado na **figura 13**. Percebe-se, deste modo, que o veículo tem condições de acompanhar esta velocidade prescrita sem dificuldades.

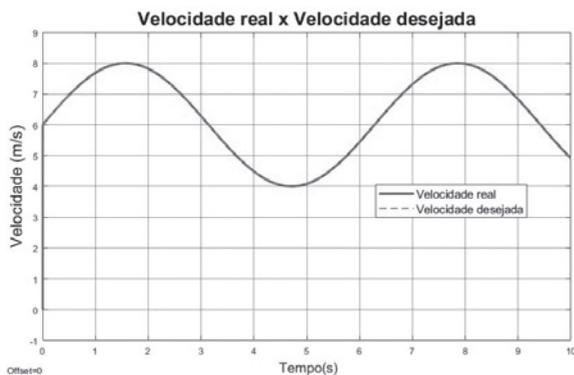


Fig. 13 – Detalhe da resposta do modelo otimizado para entrada senoidal

É necessário ressaltar, porém, que o sistema de controle até então desenvolvido é para velocidades de cruzeiro, isto é, para uma pequena variação da velocidade de entrada, fornecida pelo motorista através de um potenciômetro no pedal do motorista.

4.2 Otimização do controle com aceleração

Para o controle com aceleração, o subsistema do Motor Elétrico recebe como entrada Voltagem e Velocidade, fornecendo Torque como saída. Nesse caso, existe a limitação física do torque máximo fornecido pelo motor e da corrente nominal, acima da qual o motor não pode operar por muito tempo. Desse modo, foi limitado ao motor que operasse por até 1,5 segundos acima da corrente nominal. A partir daí, um bloco Switch garantiria que o torque máximo fornecido seria igual ao torque nominal, limitando-se, assim, a corrente máxima no motor elétrico.

A **tabela 8** mostra os valores dos parâmetros PID obtidos para o modelo que incorpora o controle de aceleração. A função convergiu após 52 iterações, sem que fosse necessário pará-la no meio do processo.

Tab 8 – Parâmetros PID para controle com aceleração, obtidos via PSO

Parâmetro	Valor
P	939393,806580017
I	0
D	2187,22186914434
N	59002,0350022799
Número de iterações	52
f_{obj}	90,8557
flag de saída	1

Simulou-se o sistema com uma entrada de grau de 7 m/s (25,2 km/h), velocidade média mínima que deve ser desenvolvida na competição *Shell Eco Marathon* para que o carro complete o percurso dentro do tempo de prova. O resultado encontra-se disposto na **figura 14**.

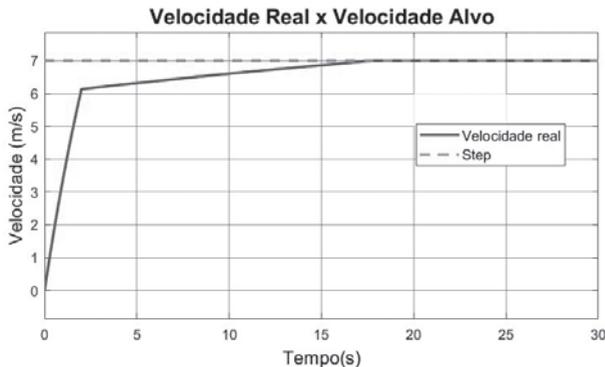


Fig. 14 – Tempo necessário para atingir a velocidade de cruzeiro de 7 m/s

A **figura 14** permite verificar que o veículo é capaz de atingir a velocidade de cruzeiro após 18 segundos. Observe que o veículo atinge a velocidade de 6 m/s em 1,5 segundos, graças ao Torque inicial máximo fornecido pelo motor elétrico. A partir de então, o torque é limitado ao torque nominal, explicando a mudança de inclinação na curva de velocidade. O motor opera sob máximo torque nominal até o momento em que atinge a velocidade especificada.

4.3 Otimização do consumo energético

O objetivo final da maratona de eficiência energética *Shell Eco Marathon* é percorrer um dado percurso, consumindo a menor quantidade possível de energia. Para isso o veículo deve completar a prova dentro de um tempo limite estipulado pela organização.

O segundo modelo desenvolvido (controle

com aceleração) é capaz de calcular a distância total percorrida pelo veículo e o respectivo consumo energético para quaisquer percurso e velocidade. Aplicando-se então as restrições da competição *Shell Eco Marathon*, é possível determinar o melhor perfil de velocidade, partindo do repouso, que permita percorrer o circuito com o menor consumo de energia.

Para tal, empregou-se um algoritmo genético de otimização, cuja rotina encontra-se presente na *Global Optimization Toolbox*, do *Matlab*. As restrições adotadas foram baseadas na competição, tal que:

- O carro deve percorrer as 14 voltas do circuito em um tempo menor do que 28 minutos; e
- O veículo não deve extrapolar o limite de segurança de velocidade, estipulado pela equipe em 45 km/h.

De modo a minimizar o esforço computacional, já elevado para rotinas de otimização que envolvem o *Simulink*, dividiu-se o percurso total em uma única volta. Assim, o veículo deveria ser capaz de percorrer, em 120 segundos, distância maior ou igual do que uma volta. Traduzindo as restrições ao algoritmo, empregou-se as presentes na **tabela 9**.

Tab 9 – Restrições ao algoritmo genético

Restrição	Valor
Distância percorrida	> 786 m
Velocidade mínima	0 km/h
Velocidade máxima	< 45 km/h
Tempo da volta	120 s

De fato, a 1ª volta é a volta de maior consumo energético, devido à grande quantidade de energia necessária para a retirada do veículo do repouso. Todas as outras voltas terão, consequente-

mente, um consumo menor. Foram utilizadas funções polinomiais de coeficientes e expoentes variáveis para representar diferentes perfis de velocidade, dada a elevada capacidade das mesmas em serem “interpoladores ideais”. Esta metodologia, em combinação com o algoritmo genético, já foi provada bem-sucedida para a aproximação de funções diversas [16].

A entrada escolhida para a velocidade foi um polinômio de 5 termos. Dessa forma, o perfil de velocidade temporal pode ser visto na equação 30.

$$v(t) = a_1 \cdot t^{b1} + a_2 \cdot t^{b2} + a_3 \cdot t^{b3} + a_4 \cdot t^{b4} + a_5 \cdot t^{b5} \quad (30)$$

Sumarizando, cada indivíduo foi formado por 10 partes (parâmetros), isto é: cada um dos coeficientes a e b presentes na equação 31. A simulação foi realizada de modo que, caso o indivíduo não fosse capaz de completar o percurso, ele estaria tão pobremente adaptado ao meio que não teria chances práticas de sobreviver. Resume-se, enfim, os parâmetros restantes do algoritmo na **tabela 10**.

Tab 10 – Configurações do algoritmo energético

Configuração	Valor
Nº de indivíduos	26
Tipo de população	vetor de doubles
Tipo de mutação	mutationadaptfeasible
Função de Seleção	selectionstochunif
Função de Crossover	crossoverscattered
Limites dos coeficientes	[-25; 25]
Limites dos expoentes	[-5; 5]

Para a aplicação do algoritmo, utilizou-se, tanto os parâmetros de PID obtidos para velocidade de cruzeiro, quanto aqueles obtidos para o caso geral que engloba acelerações. Ambos os resultados são mostrados a seguir.

4.3.1 Consumo para velocidade de cruzeiro

Aplicando os parâmetros PID descritos na **tabela 7**. A função obtida encontra-se presente na equação 31.

$$v(t) = 194995 \cdot t^{-0,172943} + 82468348 \cdot t^{-0,15650} + 0,734357 \cdot t^{0,00081} + 8125872 \cdot t^{0,3332331} - 0,08381627 \cdot t^{1,0504542} \quad (31)$$

Ao aplicar a entrada descrita na equação 31, obteve-se o perfil de velocidade apresentado na **figura 15**, com consumo de 137,3 *km/kWh*.

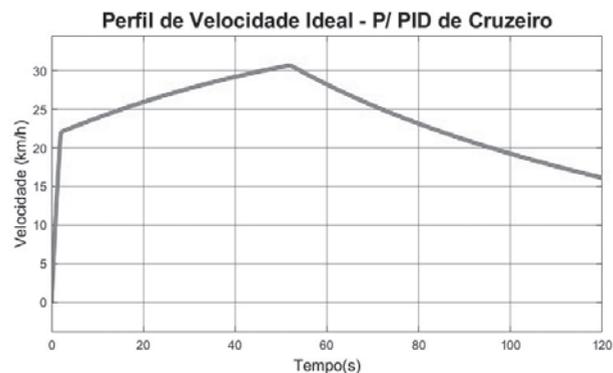


Fig. 15 – Perfil de velocidade ideal - PID de Cruzeiro

4.3.2 Consumo contemplando acelerações

Aplicando-se agora os parâmetros PID descritos na **tabela 8**, obteve-se a função apresentada na equação 32.

$$v(t) = -0,841896 \cdot t^{-1,18186} - 0,75015 \cdot t^{1,242863} + 0,776164 \cdot t^{0,621560} + 1,16937 \cdot t^{1,13881} + 1,342135 \cdot t^{-1,143936} \quad (32)$$

Ao aplicar a entrada descrita na equação 32, obteve-se o perfil de velocidade da **figura 16**.

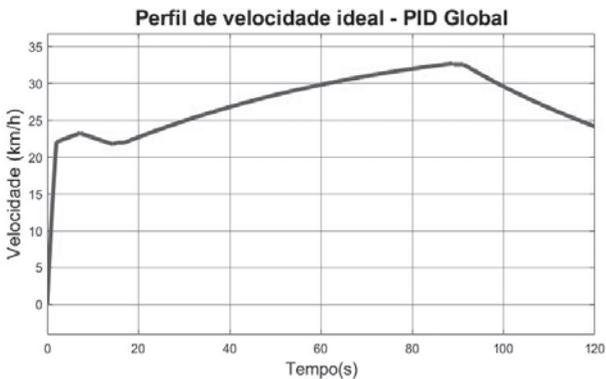


Fig. 16 – Perfil de velocidade ideal - PID com aceleração

Nesta situação, mesmo para um PID otimizado para este caso, o consumo específico foi de $120,7 \text{ km/kWh}$. Este valor, como era de se esperar, foi maior do que o consumo específico para velocidade de cruzeiro.

4.4 Análise de sensibilidade

A fim de avaliar a sensibilidade do modelo, escolheu-se a variável consumo de energia elétrica total ao longo do percurso, e também a integral quadrática dos erros, para serem otimizadas. Tendo em vista o objetivo do projeto de alta eficiência energética e bom controle para o sistema, essas variáveis devem ser minimizadas. Os parâmetros de entrada para essa análise foram amostragens aleatórias de 150 valores da massa m , raio da roda r , constante de torque do motor k_t , coeficiente de arrasto aerodinâmico C_d e coeficiente de resistência ao rolamento μ_{rr} . As amostras aleatórias foram retiradas de distribuições normais com as características expostas na **tabela 11**, de acordo com o método de Monte Carlo.

Tab 11 - Características das distribuições normais

Parâmetro	Média (μ)	Padrão (σ)
C_d	0,3	0,06
k_t	0,0486	0,000426
m	90	7
r	0,254	0,02
μ_{rr}	0,002	0,0004

Com o objetivo de analisar estatisticamente a relação entre estas variáveis, utiliza-se a correlação simples e a correlação parcial, obtidas pela extensão de *Sensitivity Analysis* do *Simulink*, as quais são apresentadas na **figura 17**. Vale observar que os resultados não se traduzem em uma indiferença do modelo quanto aos parâmetros que apresentam menor resultado de correlação. A análise mostra somente a sensibilidade a pequenas incertezas na variável de entrada.

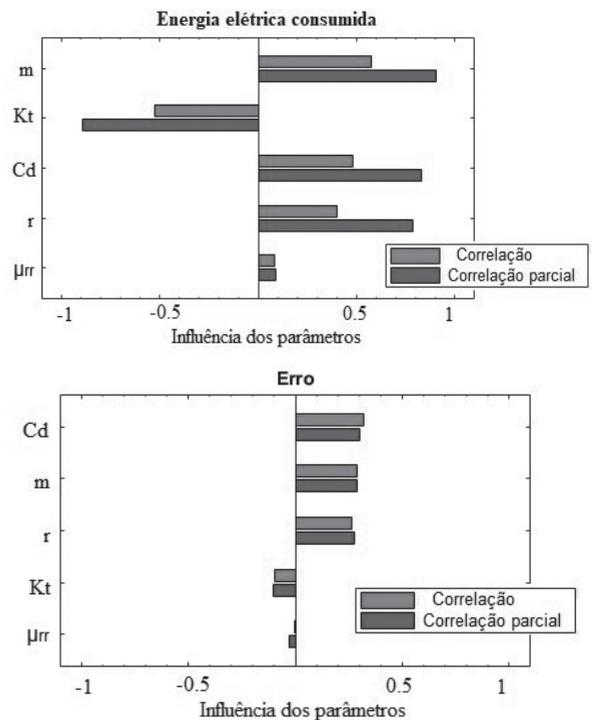


Fig. 17 – Análise estatística da relação entre as variáveis

A análise de sensibilidade indica a necessidade de boas estimativas do coeficiente de arrasto aerodinâmico, da massa do veículo e do raio da roda. É desejável também que a constante de torque assuma o valor fornecido pelo fabricante ao longo de toda a vida útil do motor, visto que uma alteração neste parâmetro implicaria perda substancial da representatividade do modelo.

5. Conclusão

O presente trabalho desenvolveu um modelo em *Simulink* de um veículo elétrico mono tripulado, com foco na simulação da dinâmica longitudinal, do motor elétrico e da bateria, visando à determinação e melhoria de seu desempenho. Para tal, os fenômenos físicos presentes foram primeiramente descritos, e posteriormente modelados numericamente por diagrama de blocos. Foram estabelecidos os sistemas integrados e correspondentes ao motor, bateria e dinâmica veicular. Finalmente, levantou-se os

parâmetros de interesse para a simulação, possibilitando a obtenção de resultados gráficos característicos da situação considerada.

Tendo em vista que o coeficiente de resistência ao rolamento e o coeficiente de arrasto aerodinâmico precisam ser estimados para o veículo em questão, é favorável à consistência do modelo que a correlação dessas variáveis com o gasto energético seja baixa. Adicionalmente, o raio da roda e a massa do veículo são variáveis de medição física razoavelmente fácil. Assim, o fato do modelo ser mais sensível a essas variáveis não compromete a consistência do modelo.

Conclui-se que o modelo desenvolvido retorna resultados otimizados de altíssima eficiência, considerando os parâmetros de interesse, o que possibilita uma melhor compreensão dos fenômenos e seus impactos na eficiência energética do veículo.

Referências bibliográficas

- [1] LARMINIE, J.; LOWRY, J. *Electric vehicle technology explained*. [S.l.]: John Wiley Sons, 2012.
- [2] GRUNDITZ, E. *Design and assessment of battery electric vehicle powertrain, with respect to performance, energy consumption and electric motor thermal capability*. [S.l.]: Chalmers University of Technology, 2016.
- [3] POPE, R. The effect of wheel speed on rolling resistance. *Journal of terramechanics*, Elsevier, v. 8, n. 1, p. 51–58, 1971.
- [4] GILLESPIE, T. D. *Fundamentals of vehicle dynamics*. [S.l.], 1992.
- [5] HUSAIN, I. *Electric and hybrid vehicles: design fundamentals*. [S.l.]: CRC press, 2003.
- [6] EHSANI, M. et al. *Modern electric, hybrid electric, and fuel cell vehicles*. [S.l.]: CRC press, 2018.
- [7] XIA, C.-l. *Permanent magnet brushless DC motor drives and controls*. [S.l.]: John Wiley Sons, 2012.
- [8] TREMBLAY, O.; DESSAINT, L.-A. Experimental validation of a battery dynamic model for ev applications. *World electric vehicle journal*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 3, n. 2, p. 289–298, 2009.
- [9] OGATA, K. *Modern control engineering*. [S.l.]: Prentice Hall Upper Saddle River, NJ, 2009.
- [10] MESSANA, A. et al. From design to manufacture of a carbon fiber monocoque for a three Wheeler vehicle prototype. *Materials*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 12, n. 3, p. 332, 2019.
- [11] SCARSELLI, G.; DONATEO, T.; LUPERTO, R. Structural frame development of a prototype car with

high energetic performance. In: Proceedings of 13th EAEC European Automotive Congress, Paper code: EAEC13/EAEC2011_C43. [S.l.: s.n.], 2011.

- [12] ROGIEST, D. et al. Design of a fuel efficient prototype's monocoque. 2017.
- [13] TARGOSZ, M. et al. Velocity planning of an electric vehicle using an evolutionary algorithm. In: SPRINGER. International Conference on Transport Systems Telematics . [S.l.], 2013. p. 171–177.
- [14] MAXON. Datasheet for EC-i 52mm, brushless, 180 Watt High Torque EC Motor . [S.l.], 2017.
- [15] XIA, C.-l. Permanent magnet brushless DC motor drives and controls. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2012.
- [16] BAQAIS, A. Genetic algorithm for function approximation: an experimental investigation. International Journal of Artificial Intelligence and Applications , v. 7, 201.