

Estudo de um motor *CC brushless* aplicado no acionamento de um carro elétrico de pequeno porte

Carlos Eduardo Presa D`Avila¹

Luiz Carlos Gertz²

Marília Amaral da Silveira³

André Cervieri⁴

Resumo

Este trabalho apresenta o estudo de um motor elétrico, empregado no acionamento de um carro elétrico de pequeno porte. O objetivo foi o de selecionar um motor que possuísse características de operação adequadas para acionar o carro elétrico, dentro de uma faixa de velocidade de 12 a 20 km/h. Testes foram realizados no carro elétrico com o objetivo de caracterizar seu comportamento dinâmico. Os resultados dos testes possibilitaram selecionar um motor CC (Corrente Contínua) sem escovas de 12 V e 5,91 A com eficiência máxima de 77%. Um estudo teórico foi desenvolvido, para determinar a melhor relação de transmissão de movimento do motor para o carro. Assim, foi possível determinar as condições de operação do motor nas quais o mesmo desenvolveu seu melhor rendimento, quando era acionado o carro elétrico. O valor da relação de velocidade do motor para o carro resultou em 64:1. O estudo demonstrou que, para operar com uma velocidade de 20 km/h, o carro requer uma potência de 58 W do motor elétrico.

Palavras-chave: Motor CC sem escovas. Carro elétrico. Eficiência energética.

Abstract

This work presents the study of an electric motor, which was used to drive a small electric car. The aim was to select a motor with characteristics of suited operation to drive the electric car at a speed range from 12 to 20 km/h. Tests were carried out on the electric car with the purpose of determining its dynamic behavior. The test results allowed to select a DC (Direct Current) brushless electric motor of 12 V and 5.9 A with 77% of maximum efficiency. A theoretical study was developed to determine the best relation of the movement transmission from the motor to the car. By doing that, it was possible to determine the characteristics of the operation of the motor in which it developed its maximum efficiency, when the electric car was started up. The speed ratio value resulted in 64:1. The study showed that to operate a 20 km/h speed, the car requires a mechanical power of 58 W from its electric motor.

Keywords: DC brushless motor. Electric car. Energy-efficiency.

1 Engenheiro Eletricista, Especialista em Tecnologia da Informação e Mestre pela Universidade Luterana do Brasil (ULBRA), Canoas (RS), Brasil. Professor da Fundação Liberato Salzano Vieira da Cunha, Novo Hamburgo, RS, Brasil. Email: cdavilars@gmail.com

2 Engenheiro Mecânico, Mestre e Doutor pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), RS, Brasil. Professor e pesquisador do Programa de Pós-graduação em Engenharia, Ambiente e Materiais (PPGEAM) da ULBRA. E-mail: gertzx@gmail.com

3 Engenheira Eletricista, Mestre e Doutora pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul. (UFRGS). Professora e pesquisadora do Programa de Pós-graduação em Engenharia, Ambiente e Materiais (PPGEAM) da ULBRA. E-mail: marilia.amaral@ulbra.br

4 Engenheiro Mecânico, Mestre e Doutor pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Professor e pesquisador do Programa de Pós-graduação em Engenharia, Ambiente e Materiais (PPGEAM) da ULBRA. E-mail: acervieri@gmail.com
Artigo recebido em 23/03/2011 e aceito em 16/09/2011.

1 Introdução

De acordo com a *National Electrical Manufacturers Association* (NEMA), um motor CC (Corrente Contínua) sem escovas/DC (Direct Current) *brushless motor* é uma máquina síncrona girante com ímãs permanentes no rotor e com a posição do rotor conhecida, para possibilitar a comutação eletrônica (EMADI, 2005a; 2005b). Uma das vantagens do motor CC *brushless* sobre os motores de corrente contínua convencionais é a ausência de um comutador eletromecânico e de escovas. Quando comparados com os motores CC com escovas, os motores CC *brushless* têm maior eficiência, menor ruído e menor relação entre suas dimensões e a potência que podem desenvolver.

A potência elétrica é fornecida ao motor CC *brushless* através de uma fonte de tensão contínua e de um sistema de controle eletrônico que realizará a comutação eletrônica. Um dispositivo de detecção de posição pode ser empregado para determinar a posição do rotor com relação às fases do enrolamento da armadura. O sistema de controle eletrônico deve fornecer a sequência de comutação de acordo com o sinal dos sensores de posição, para ativar as fases do enrolamento da armadura e assim, manter o motor em funcionamento (CHAI, 1998).

Um carro elétrico é um veículo que utiliza um ou mais motores elétricos para sua propulsão. As pesquisas na área têm tido um crescimento significativo, devido à necessidade de preservação e conservação das fontes não renováveis de energia.

A primeira versão do carro elétrico desenvolvida pelos autores utilizava um motor de corrente contínua com escovas de 80 W de potência elétrica nominal de entrada. O referido motor apresentava um rendimento considerado baixo em relação ao desejado. Com o objetivo de elevar a eficiência energética do carro elétrico, foram desenvolvidos estudos para substituir o motor CC convencional por um motor CC *brushless*, acionado e controlado por um sistema eletrônico. A eficiência de um motor CC é afetada pelas perdas no con-

tato entre as escovas e o comutador mecânico, além das perdas elétricas por efeito Joule na passagem da corrente elétrica pelas bobinas do rotor e do estator. Aspectos relacionados às características construtivas e de operação, tais como a distorção do campo magnético e, também, o deslocamento da linha neutra do campo magnético, reduzem a eficiência de máquinas CC.

2 Evolução dos carros elétricos

No início do século vinte, nos primórdios da história do automóvel, existiam três tipos de veículos: os movidos a vapor, com 1684 unidades, os movidos a gasolina, com 963 unidades e os movidos a eletricidade, com 1575 unidades (WESTBROOK, 2001). Os veículos a vapor de pequeno porte apresentavam alguns inconvenientes; como a demora para atingir as condições necessárias para se locomover, devido ao tempo necessário para o aquecimento da água. Existia ainda, o inconveniente da necessidade de constantes reabastecimentos. Porém, uma das principais causas do seu desaparecimento foi o perigo de explosão das caldeiras. Isso ocorria principalmente pela falta de qualidade do material disponível e pelo processo de construção que não utilizava solda para união das partes, como ocorre atualmente, mas sim rebites.

Entre 1900 e 1920, os veículos movidos a gasolina e os elétricos (a bateria) disputavam o mercado em condições de igualdade. Os veículos elétricos eram silenciosos e não produziam gases poluentes. Já os movidos a gasolina possuíam grandes inconvenientes e um dos principais problemas era o sistema de acionamento do motor. A partida era feita através de uma manivela, acoplada ao eixo, na parte frontal do veículo, sendo que, para acioná-la, era necessário sair do veículo, executar a tarefa em uma posição desconfortável e a custo de grande esforço. Além de desagradável, expunha o operador ao risco de sofrer contusões ou até mesmo lesões graves. Paradoxalmente, a evolução dos motores elétricos permitiu que um pequeno motor alimentado por bateria fosse utilizado para acionar o mo-

tor a gasolina. Dessa forma, um dos maiores problemas dos veículos movidos a gasolina foi eliminado. Além disso, outros fatores fizeram com que os veículos movidos a eletricidade não prevalecessem (MEHRDAD *et al.*, 2005) em função da fácil obtenção da gasolina em postos no interior da América do Norte em relação à dificuldade de se obter a recarga das baterias no interior. Outro fator importante era o custo mais elevado do veículo elétrico em relação ao veículo a gasolina. O modelo T da Ford, em 1925, custava 560 dólares, enquanto que um veículo elétrico a bateria custava 1.760 dólares.

Além disso, foram descobertas grandes reservas de petróleo na Arábia Saudita, Rússia e Pérsia, estabilizando o preço do barril de petróleo de 1910 até 1970, devido ao acréscimo significativo da oferta (LEITMAN, 2009). Esses aspectos contribuíram para o aumento da produção de veículos a combustão interna, alimentados por gasolina e ou diesel, refletindo na emissão de grandes quantidades de gases poluentes. Mas, a partir de 1973, com a crise do petróleo, durante o embargo árabe, ocorre a rápida elevação do preço do barril de petróleo que, somada aos problemas de poluição atmosférica, criou condições para o reaparecimento dos veículos elétricos e híbridos (MEHRDAD *et al.*, 2005).

3 O carro elétrico desenvolvido na ULBRA

Na ULBRA- Canoas (RS), os autores desenvolveram um carro elétrico (figura 1),

cujo motor recebe energia de uma bateria de 12 V/6 Ah, para operar com velocidade entre 12 e 20 km/h. Seu sistema de propulsão é composto de um motor elétrico, que recebe energia elétrica de uma bateria e de um conjunto de engrenagens responsáveis pela redução da velocidade, com uma relação de redução compatível com a faixa de operação do carro.

As características construtivas do carro desenvolvido por esses autores são apresentadas no quadro 1.

Quadro 1 - Características do carro elétrico - ULBRA – Canoas

Carro	Peso	220N
	Comprimento	2382 mm
	Largura	761 mm
	Altura	658 mm
	Distância entre eixos	1685 mm
	Rodas	Número: 3 Diâmetro: 0,5 m
Sistema de propulsão	Um motor CC <i>brushless</i> , 80 W (potência elétrica), 12 V, 5,91 A, 13600 rpm	
	Conjunto de duas engrenagens planetárias acopladas, relação de transmissão de 36:1	
	Par de engrenagens, relação de transmissão de 2:1	
	Relação total de transmissão: 64:1	
	Bateria: 12 V, 6 Ah	
Um sistema de controle eletrônico do motor CC		
Direção	Sistema de trapézio simples, com barra de conexão entre as pontas de eixo, geometria de Ackerman	

Fonte: Os autores (2009).

Figura 1 – Fotografia do carro elétrico



Fonte: Os autores (2009).

3.1 Ensaios do carro elétrico

O carro elétrico foi ensaiado com o objetivo de determinar-se o comportamento da potência requerida pelo mesmo, em função da velocidade que deve desenvolver. Por meio de medições, foi possível obter informações que possibilitaram a definição do sistema de propulsão. Para a execução dos testes, foi empregada uma série de materiais e métodos para os ensaios das características dinâmicas do carro elétrico. O carro foi testado em uma pista com superfície plana e em um dinamômetro inercial. Os equipamentos utilizados nos ensaios dinâmicos são descritos a seguir:

- balança, escala de 0 a 2950 N, resolução de 0,98 N e incerteza de $\pm 1\%$;
- dinamômetro, com escala de 0 a 1962 N, resolução de 9,81 N e incerteza de $\pm 4,90\%$;
- velocímetro, com resolução de 0,028 m/s, indicação entre 0 a 27,78 m/s e incerteza de 0,28 m/s ($\pm 1\%$);
- dinamômetro inercial para protótipos leves, rolos com diâmetro de 180 mm, largura dos rolos de 2 m e momento de inércia total $J = 0,7 \text{ kgm}^2$.

3.2 Ensaios dinâmicos

Inicialmente, o carro teve todos os seus dispositivos e componentes revisados e testados, a fim de minimizar riscos de que os dados e resultados obtidos apresentassem discrepância com a finalidade proposta pelo protótipo. Os procedimentos adotados foram os seguintes:

- os pneus tiveram a sua pressão ideal observada, sendo de 60 lb/in², para que a perda por atrito fosse minimizada;
- o sistema de freio foi ajustado, para evitar atritos indesejados entre os discos e as pastilhas.

Os testes realizados para identificar as perdas envolvidas nos conjuntos mecânicos e no arrasto aerodinâmico foram efetuados, utilizando-se uma câmera digital com cronômetro integrado, um velocímetro digital, instalado no veículo e os sistemas mecânicos que

constituem o protótipo. O carro foi acionado e, após atingir uma velocidade de 9,7 m/s (35 km/h), seu funcionamento foi interrompido. Nesse instante, foi iniciada a coleta de dados do velocímetro até o carro ter a sua parada total, causada pelas forças de atrito atuantes. O teste foi efetuado, repetidamente, num total de seis vezes para que as incertezas de leitura e de medição fossem minimizadas. Com tais dados, foi possível traçar uma curva de decréscimo da velocidade com o tempo.

3.3 Análise dos dados coletados

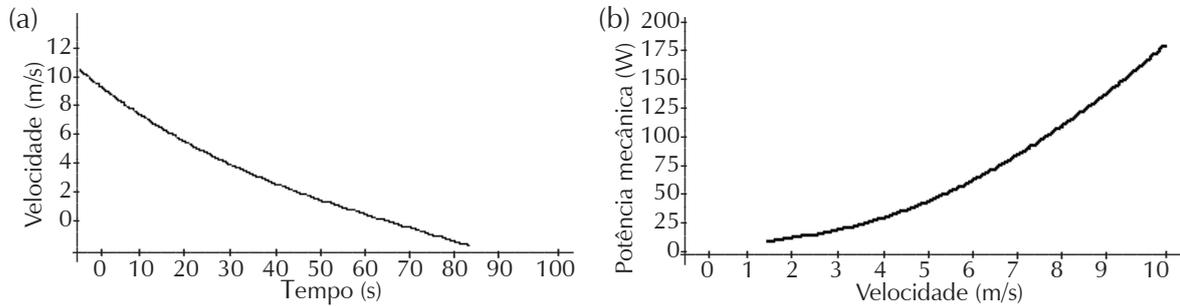
Com os ensaios de redução da velocidade pelo tempo, foi construída uma curva, identificando a redução da velocidade em cada instante de um segundo transcorrido. Os valores das velocidades identificam a desaceleração em cada instante. A curva é mostrada na figura 2(a). Como a massa do carro, com piloto a bordo, é conhecida ($86,00 \pm 0,95 \text{ kg}$) e utilizando a Segunda Lei de Newton, calcularam-se as forças que identificam as perdas incidentes sobre o veículo, para cada instante t . Uma vez identificados os valores de força, foi possível obter-se a potência necessária para manter o carro em movimento em diversas faixas de velocidade. Da equação 1, obtém-se a figura 2(b) que mostra o gráfico da potência mecânica requerida pelo carro elétrico em função da velocidade desenvolvida pelo mesmo:

$$P = F_T v_t \quad (1)$$

onde, P é a potência mecânica requerida pelo carro em watt, F_T é a força em newton, e v_t é a velocidade tangencial das rodas do carro em m/s.

Através dos ensaios, foi possível obter os valores de potência mecânica requeridos pelo carro, em função da velocidade que desenvolve. Para que o carro opere a 20km/h (5,56 m/s), a potência mecânica a ser fornecida a ele é de aproximadamente 58,0 W. Para operar a 12km/h (3,33m/s), o carro requer uma potência mecânica de 23,5W.

Figura 2 – Gráficos resultantes dos testes com o carro elétrico: (a) velocidade do carro x tempo; (b) potência requerida pelo carro elétrico x velocidade do carro

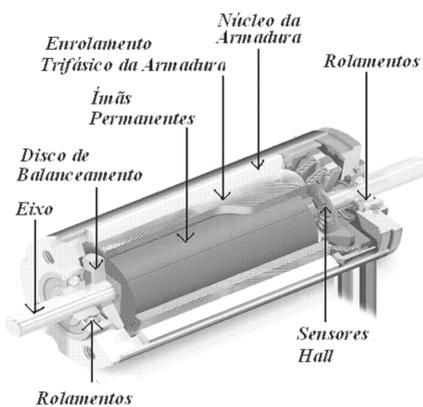


Fonte: Os autores (2009).

4 Análise e características de funcionamento do motor CC sem escovas

No motor CC sem escovas (motor CC *brushless*), utilizado no carro elétrico, o enrolamento trifásico da armadura está conectado a um circuito de chaveamento eletrônico. O rotor possui dois ímãs permanentes com formato cilíndrico composto de $Nd_2Fe_{14}B$ (Neodímio-Ferro-Boro). Um sistema de detecção de posição do rotor é utilizado para determinar a sequência de chaveamento das fases. Quando o motor está em operação, o sistema de controle faz o chaveamento das bobinas do enrolamento da armadura na sequência e no tempo corretos. Para que isso ocorra, é necessário que o sistema de controle identifique a posição do campo magnético do rotor em relação às fases do enrolamento da armadura. No motor em estudo, são utilizados sensores Hall para detecção da posição do rotor. A figura 3 mostra um desenho do motor CC *brushless* em estudo. A figura 4 mostra um

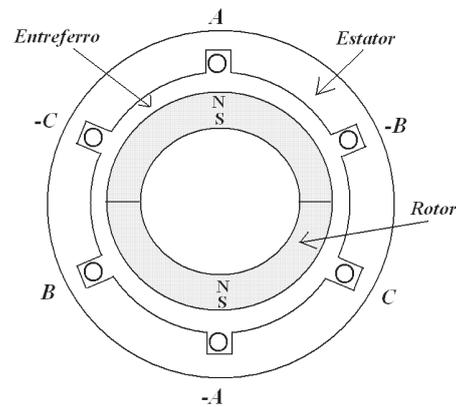
Figura 3 – Desenho do motor CC *brushless* - Maxon



Fonte: Treffer Tecnologias (2008).

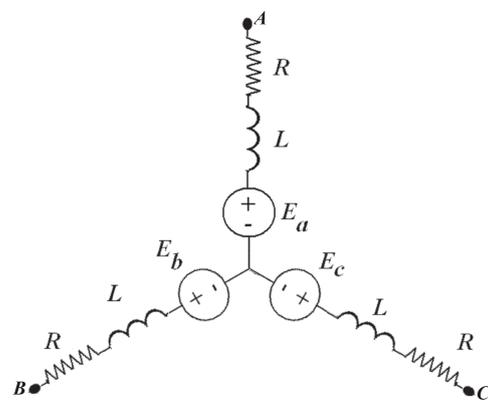
desenho simplificado de um motor *brushless* em corte transversal. O enrolamento trifásico da armadura é representado pelas fases A, B e C. O modelo do motor CC *brushless* é mostrado na figura 5. Na figura, R é a resistência de uma fase, L é a indutância de uma fase, E_a, E_b e E_c são as forças contraeletromotrizes (fcem) induzidas nas fases A, B e C, respectivamente (CHAI, 1998).

Figura 4 – Desenho em corte transversal do motor *brushless* CC



Fonte: Chai (1998).

Figura 5 – Modelo do motor CC *brushless*

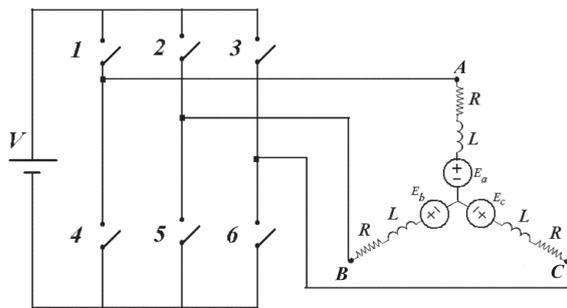


Fonte: Chai (1998).

4.1 Acionamento do motor CC brushless

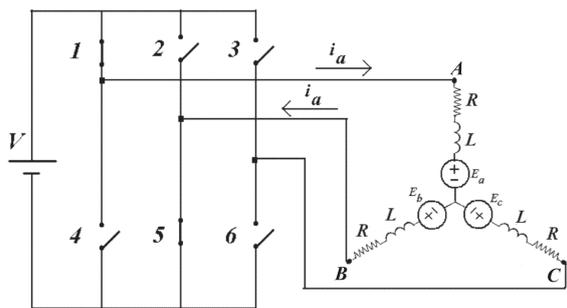
O motor *brushless* é acionado através de um inversor de ponte completa com seis chaves. A figura 6 mostra o desenho esquemático do sistema de chaveamento. Quando o rotor encontra-se na posição mostrada na figura 6, o controlador deverá chavear a fase A. O sentido da corrente deve ser tal, que a corrente deve percorrer a fase A com o sentido mostrado na figura 7. As chaves 1 e 5 são fechadas, e a corrente percorre as fases A e B. O sentido da rotação do motor é anti-horário. Para a produção de uma volta completa, a sequência de acionamento das chaves é 1-5, 1-6, 2-6, 2-4, 3-4, 3-5.

Figura 6 - Desenho esquemático do sistema de chaveamento do motor *brushless*



Fonte: Chai (1998).

Figura 7 – Sentido da corrente nas fases do enrolamento da armadura



Fonte: Chai (1998).

Quando duas fases do enrolamento da armadura são percorridas por corrente, a tensão terminal de um motor CC *brushless* trifásico, conectado em Y, com seis chaves, com um inversor de ponte completa, pode ser expressa pelas equações apresentadas a seguir (EMADI, 2005a; EMADI, 2005b):

$$V = E_f + 2R_a i_a + 2L_a \frac{di_a}{dt} \quad (2)$$

Em (2), V é a tensão contínua aplicada entre duas fases, E_f é a força contraeletromotriz medida entre duas fases, resultante da composição fasorial das f_{cem} 's induzidas nas duas fases que estão sendo percorridas por corrente, R_a e L_a são, respectivamente, a resistência e a indutância de uma fase do enrolamento da armadura, e i_a é a corrente que percorre as duas fases. A tensão E_f tem um comportamento trapezoidal no motor em análise e, assim, pode ser considerada aproximadamente constante (SU *et al.*, 2000). A forma de onda da força contraeletromotriz é trapezoidal, porque a distribuição da densidade de fluxo magnético produzida pelos ímãs permanentes no entreferro tem um formato trapezoidal. As tensões de fase estão defasadas entre si de 120° elétricos (WANG *et al.*, 2007). Se uma corrente contínua I_a é fornecida pela bateria ao módulo de controle do motor, pode-se relacionar essa corrente com o torque desenvolvido internamente pelo motor pela equação (3):

$$T = k_t I_a \quad (3)$$

Na equação (3), k_t é a constante do torque, expressa em Nm/A e T é o torque interno desenvolvido pelo motor CC *brushless*. Esse torque é igual à soma do torque de carga, aplicado ao eixo do motor, T_c , somado ao torque interno de fricção, T_r . Esse último pode ser obtido pelo produto da constante do torque, pela corrente a vazio do motor, I_o , de acordo com $T_r = k_t I_o$. A tensão E_f pode ser calculada através da constante de velocidade do motor, k_n , de acordo com a equação (4):

$$E_f = \frac{n}{k_n} \quad (4)$$

Na equação (4), k_n é a constante da velocidade, expressa em rpm/V, e n é a velocidade de rotação do motor, em rpm. Quando se considera a corrente contínua I_a , a equação da tensão aplicada é expressa por (5):

$$V = E_f + 2R_a I_a \quad (5)$$

Se E_f é substituído pela equação (4), e I_a é substituído pela equação (3), após algumas operações, obtém-se a equação (6):

$$n = k_n \left(V - \frac{2R_a T}{k_t} \right) = k_n \left(V - \frac{2R_a (T_c + T_r)}{k_t} \right) \quad (6)$$

O comportamento teórico da potência mecânica de saída do motor pode ser obtido através do comportamento do torque no eixo do motor, por meio da equação (7):

$$P_m = T_c w_m \quad (7)$$

Na equação (7), P_m é a potência mecânica de saída do motor CC *brushless*, em watts, T_c é o torque no eixo, em Nm, e w_m é a velocidade angular do rotor, em rad/s. A potência elétrica de entrada, P_e , é calculada pela equação (8):

$$P_e = V I_a \quad (8)$$

O rendimento do motor é calculado por:

$$n = \frac{P_m}{P_e} = \frac{P_m}{P_m + \text{Perdas}} \quad (9)$$

As perdas de potência do motor CC *brushless* englobam as perdas por atrito e ventilação, as perdas no núcleo e as perdas no cobre do enrolamento da armadura. As perdas no cobre do enrolamento da armadura, P_R , dependem a condição de carga do motor e são calculadas pela equação (10):

$$P_R = 2R_a I_a^2 \quad (10)$$

As perdas por atrito, ventilação, e as perdas no núcleo por histerese e correntes parasitas compõem as perdas rotacionais. Quando o motor está operando a vazio, sem carga mecânica acoplada ao seu eixo, a potência elétrica fornecida a ele supre as perdas no cobre e as perdas rotacionais (FITZGERALD *et al.*, 2006). A potência elétrica a vazio, P_o , é calculada pela equação (11):

$$P_o = V I_o \quad (11)$$

onde, I_o é a corrente absorvida pelo motor a vazio. As perdas rotacionais são calculadas

pela equação (12):

$$P_{rot} = P_o - (2R_a I_o^2) \quad (12)$$

Essas perdas são consideradas constantes, independentes da condição de carga com a qual o motor atua. Quando o motor está operando com certa carga acoplada ao seu eixo, subtraindo-se da potência elétrica de entrada, P_e , as perdas no cobre, obtém-se a potência elétrica convertida em potência mecânica, P_{conv} . A potência mecânica fornecida à carga é calculada pela diferença entre a potência convertida e as perdas rotacionais.

4.2 Seleção do motor CC *brushless*

O motor CC *brushless* foi selecionado com base na tensão da bateria e nos valores de potência mecânica, requeridos pelo carro elétrico para operar na faixa de velocidade para a qual foi projetado. O quadro 2 apresenta as principais características do motor CC *brushless* selecionado.

Quadro 2 - Características do motor CC *brushless* em estudo

Especificação do motor Maxon EC 32	Valor
Tensão nominal [V]	12
Velocidade a vazio [rpm]	15100
Corrente a vazio [mA]	901
Velocidade nominal [rpm]	13600
Torque nominal [mNm]	38,3
Corrente nominal [A]	5,91
Resistência terminal entre fases $2R_a$ [Ω]	0,203
Indutância terminal entre fases $2L_a$ [mH]	0,03
Número de ímãs permanentes	2
Constante do torque k_t [mNm/A]	7,48
Constante da velocidade k_n [rpm/V]	1280

Fonte: Treffer Tecnologias (2008).

Através das características apresentadas no quadro 2, obtiveram-se os valores teóricos das perdas e do rendimento apresentados pelo motor CC *brushless*. Quando o motor está vazio, as perdas de potência são iguais a 10,81 W e as perdas no cobre, iguais a 0,165 W. As perdas rotacionais são iguais a 10,64 W. Em

condições nominais de operação, a potência elétrica fornecida ao motor é igual a 70,92 W. As perdas no cobre, nessa condição, são iguais a 7,09 W. A diferença entre essas duas potências corresponde à potência elétrica convertida em potência mecânica, sendo igual a 63,83 W. A potência mecânica fornecida à carga é igual a 53,19 W. O rendimento teórico do motor, quando em condições nominais de operação, é igual a 75 %, que é ligeiramente inferior ao rendimento máximo de 77 %, que esse motor pode apresentar. Os valores de potência foram calculados para uma tensão aplicada de 12 V.

O comportamento teórico do motor CC *brushless* foi analisado com o objetivo de se determinar a relação de velocidades do sistema de transmissão. Primeiramente, foram obtidos os valores da rotação, desenvolvida pelo motor em função do torque de carga aplicado ao seu eixo, considerando que a tensão da bateria era de 12 V. Os valores teóricos da rotação foram calculados através da equação (6) e das especificações do quadro 2. O gráfico resultante é mostrado na figura 8. Para o cálculo da rotação, foram definidos valores para o torque de carga, aplicado ao eixo do motor, desde zero até o valor que produzisse rotação nula. O resultado é uma reta que expressa o comportamento da rotação em função do torque de carga, aplicado no eixo, para uma tensão de 12 V, aplicada ao motor. Outras duas retas foram obtidas, uma para a tensão de 8 V, e outra, para 10 V. Em cada reta, o ponto de maior rotação corresponde à condição em

que o motor está sem carga mecânica acoplada ao seu eixo. O ponto, onde a rotação é igual a zero, corresponde à condição de rotor bloqueado.

O comportamento teórico da potência mecânica de saída do motor CC *brushless* em função da rotação foi obtido através da equação (7) e da característica rotação x torque de carga mostrada no gráfico da figura 8. A velocidade do motor em *rpm* foi convertida em *rd/s* e, a seguir, na velocidade angular das rodas do carro, w_c , aplicando-se a relação de transmissão, g_r , de acordo com a equação (13):

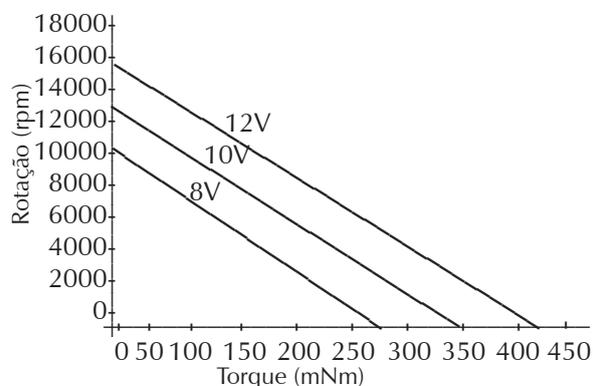
$$w_c = g_r w_m \quad (13)$$

onde, w_c é a velocidade angular das rodas do carro, quando acionadas pelo motor *brushless*. Quando w_c é multiplicada pelo raio das rodas do carro, R , a velocidade angular é convertida em *m/s*, de acordo com a equação (14):

$$v_c = R w_c \quad (14)$$

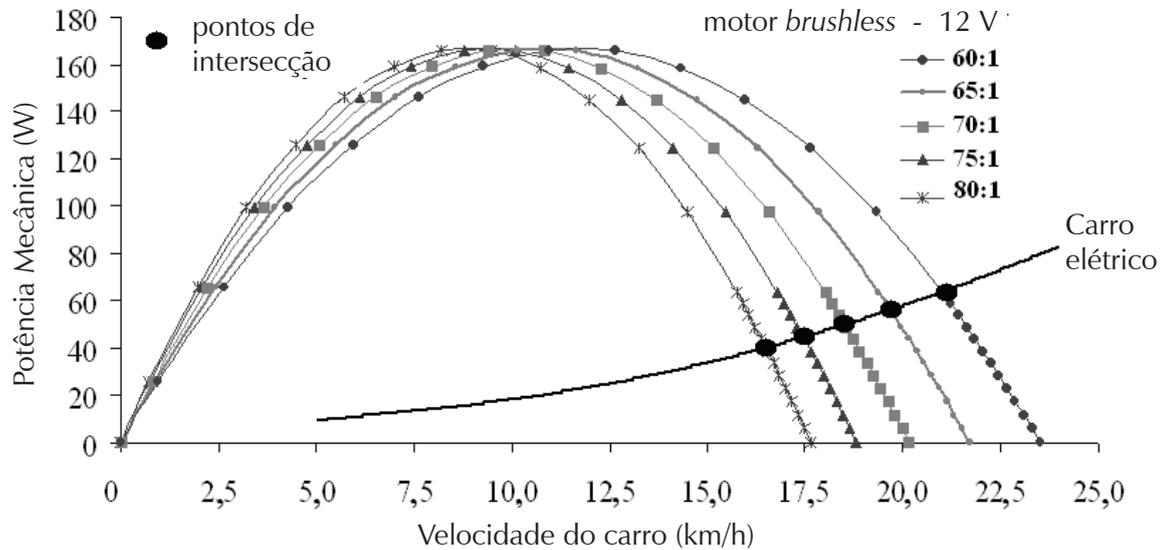
onde, v_c é a velocidade tangencial das rodas do carro em *m/s*, denominada de v_t na equação (1). A figura 9 mostra um conjunto de curvas que representa o comportamento da potência mecânica de saída do motor em função da velocidade do carro. Cada curva foi obtida para uma relação de transmissão. As curvas teóricas da potência de saída do motor *brushless* foram comparadas com a curva da potência mecânica, requerida pelo carro, obtida através de testes. Os pontos de interseção representam os pontos de operação do carro, quando acionado pelo motor *brushless*. São apresentadas curvas produzidas para cinco diferentes valores de relação de transmissão, para 12 V de tensão aplicada ao motor. A condição de operação considerada mais adequada resultou da aplicação de uma relação de transmissão de 65:1. Em função das características do sistema de transmissão utilizado, foi escolhida uma relação de 64:1.

Figura 8 – Gráfico da característica teórica rotação x torque de carga do motor CC *brushless*



Fonte: Os Autores (2009).

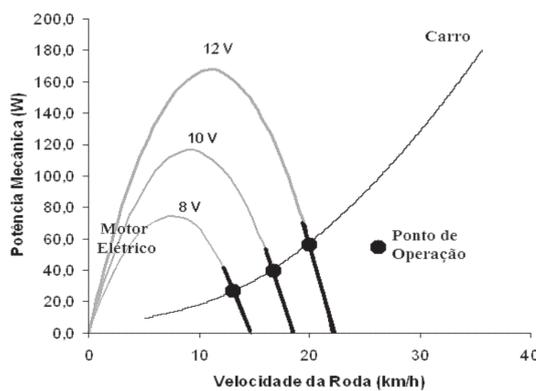
Figura 9 – Gráfico da potência mecânica x velocidade do carro elétrico, para cinco diferentes valores de relação de transmissão



Fonte: Os autores (2009).

Após definida a relação de transmissão, foi analisado o comportamento do carro elétrico, quando acionado pelo motor *brushless*, para as tensões de 8 V e 10 V. As curvas características de potência estão representadas no gráfico da figura 10.

Figura 10 – Gráfico potência mecânica x velocidade em km/h



Fonte: Os autores (2009).

Nesse gráfico, três pontos de operação estão representados, sendo que cada um refere-se a um valor de tensão da bateria (8V, 10V e 12V). Todas as curvas foram obtidas para uma relação de velocidade de 64:1. A porção útil de cada curva (destacada em preto) representa o comportamento da potência mecânica do

motor, a partir da condição sem carga (potência mecânica igual a zero, mínima corrente da armadura) até a condição de corrente nominal. A porção mais clara de cada curva representa os pontos de sobrecarga até a condição de rotor bloqueado. O sistema de controle do motor deve incluir uma unidade de proteção que limita a corrente do motor em um valor seguro.

5 Conclusões

A comparação do comportamento da potência mecânica de saída do motor CC *brushless* com o comportamento da potência mecânica, requerida pelo carro elétrico, permitiu definir o sistema de redução de velocidade. O carro elétrico foi projetado para operar dentro de uma faixa de uma velocidade de 3,33 a 5,56 m/s (12 a 20 km/h). Para operar com velocidade de 20 km/h, o carro elétrico requer uma potência de aproximadamente 58 W. O motor elétrico poderá atender essa condição, quando a tensão entre seus terminais for igual a 12 V. O carro desenvolverá uma velocidade de 12,81 km/h, quando a tensão entre os terminais do motor for igual a 8 V. Esses valores foram calculados para uma relação de velocidade de 64:1. Valores menores de redução produzem maiores velocidades do carro,

porém, o motor operará em sobrecarga. Valores maiores de redução produzem velocidades mais baixas.

O comportamento do carro elétrico foi analisado para trajetórias em superfícies planas, sem aclives ou declives. A próxima etapa do trabalho envolverá a determinação da potência requerida pelo carro, em função da sua velocidade, em superfícies com aclives. O desenvolvimento dessa nova etapa terá por objetivo especificar um segundo motor elétrico CC *brushless*, a ser acionado, quando houver necessidade de produção de potência mecânica acima de 90 % da potência nominal do primeiro motor. Uma vez concluída a especificação dos motores, o carro será testado para avaliar seu consumo de energia elétrica em diferentes tipos de trajetórias e velocidades.

Referências

- CHAI, H. **Electromechanical motion devices**. Upper Saddle River: Prentice Hall, 1998.
- EMADI, A. **Energy-efficient electric motors**. 3. ed. New York: Marcel Dekker, 2005a.
- _____. (Ed.). **Handbook of automotive power electronics and motor drives**. Boca Raton: Taylor & Francis Group, 2005b.
- FITZGERALD, A.E.; KINGSLEY JR, C.; UMANS, S. D. **Máquinas elétricas**, 6. ed., São Paulo: Bookman, 2006.
- LEITMAN, S.; BRANT, B. **Build your own electric vehicle**. 2.ed. New York: McGraw-Hill, 2009.
- MEHRDAD, E. *et al.* **Modern electric, hybrid electric, and fuel cell vehicles**. 1. ed. New York: CRC Press, 2005.
- SU, G. J.; MCKEEVER, J. W.; SAMONS, K. S. Design of a PM brushless motor drive for hybrid electric vehicle application. In: PCIM 2000 Conference, 2000, Boston. **Proceedings...**
- TREFFER TECNOLOGIAS. **Maxon Motores**. Belo Horizonte, 2008. Disponível em: <<http://www.treffer.com.br/produtos/maxon/motores/pdf/164.pdf/201>>. Acesso em: 10 set. 2008.
- WANG, J.; ZHOU, L.B.; TAO, G.L.. Design and analysis of a multiphase permanent magnet brushless DC motor drive system for high power applications. In: The IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, 2007, Harbin. **Proceedings...** p. 1182 – 1187.
- WESTBROOK, M. H. **The electric car**. 1. ed. London: IET, 2001.