

SISTEMA DE TRANSMISSÃO DE UM VEÍCULO ELÉTRICO

Paulo Antonio dos Santos¹

Francisco José Grandinetti¹ (grandi@unitau.br)

Marcio Abud Marcelino² (abud@feg.unesp.br)

Heitor Giovanelli Carlesimo²

¹ Universidade de Taubaté, Av. Nove de Julho 246, CEP 12020-200, Taubaté-SP

² Universidade Estadual Paulista, Av. Ariberto pereira da Cunha, Guaratinguetá-SP

Resumo. As indústrias automobilísticas estão reconhecendo a necessidade de explorar novas fontes de energia, devido à escassez e os problemas ambientais gerados pelo petróleo. Assim, várias formas de gerar energia vêm sendo estudadas, entre elas, fontes de energia elétrica, onde os veículos são tracionados por motores elétricos. Em geral os primeiros veículos elétricos possuem um sistema de acionamento por meio de motores de corrente contínua que, embora causassem desgaste excessivo nos comutadores, tinham a vantagem da variação da rotação por meio da variação de tensão. Assim, este trabalho tem como objetivo projetar um sistema de acionamento, controle e transmissão mecânica que permitirá desenvolver uma velocidade máxima de 60,8 km/h, e será composto por três partes: Motor, Controlador de velocidade e um redutor de velocidade. O motor AC, em geral de indução trifásico, possui a vantagem de baixa manutenção e alta robustez, mas necessita de uma variação da tensão em relação à frequência, sugerindo a utilização de inversores de frequência. O inversor utilizado neste trabalho é um modulador por largura de pulsos (PWM) de malha aberta, discreto, otimizado e projetado através de um micro controlador de baixo custo, se comparado a inversores de frequência encontrados no mercado. O PWM discreto gera pulsos para o controle da velocidade do motor elétrico e é comandado por um acelerador eletrônico. No eixo de saída do motor elétrico acopla-se um redutor de velocidade (angular) composto por duas polias e uma correia. O redutor de velocidade adequará a rotação e torque do motor para a rotação e torque requerido pelo eixo da rodas motriz do veículo elétrico.

1. INTRODUÇÃO

Nos veículos com motor a combustão, o processo de aceleração é obtido através de um cabo que, por meios mecânicos, acionam a borboleta de movimentação, conseguindo assim um aumento ou redução da velocidade do veículo. Estudos indicam que mesmo se tratando de veículos a combustão, há necessidade de se ter uma dirigibilidade mais suave, evitando os trancos nas acelerações e retomadas, para se reduzir o consumo de combustível. A Fiat Automóveis desenvolveu um acelerador eletrônico chamado *Drive by wire*, que elimina o cabo do acelerador, dando lugar a um pedal que, por meio de um potenciômetro, atua no movimento da borboleta de aceleração (Lucena et. al., 2007).

Nos veículos elétricos o sistema de acionamento pode ser realizado por meio de motores AC, de indução trifásico, que possuem a vantagem de baixa manutenção, elevado índice de confiabilidade e alta robustez, porém necessitam de uma variação da tensão em relação à frequência, em geral, mediante o uso de inversores. O inversor utilizado neste projeto é um PWM de malha aberta, discreto e otimizado, implementado com componentes e micro controlador de baixo custo, quando comparado com inversores comerciais (Marcelino, 1999). O inversor gera pulsos para o controle da velocidade, sendo comandado por um acelerador manual, realizado por duas chaves *push-button*, localizadas na direção do veículo, de acordo com o diagrama da Figura 1.

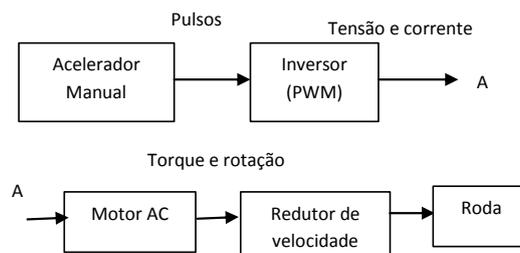


Figura 1. Diagrama de blocos do sistema transmissão.

A Figura 2 apresenta a placa do inversor PWM discreto, destacando as chaves de aceleração. Uma terceira chave foi utilizada, conforme apresentada na Figura 2, para ligar e desligar o PWM [4].

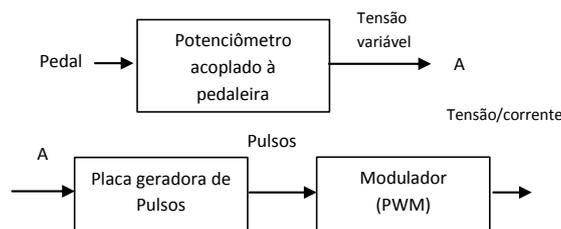


Figura 2. Diagrama de blocos do controle de velocidade com acelerador eletrônico.

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um sistema de transmissão equipado com acelerador eletrônico, que será acionado por um pedal mecânico acoplado a um potenciômetro, que irá variar a tensão de entrada de uma placa controladora, permitindo a geração lenta de pulsos, em tempo pré-determinado, para que o motor não aplique um torque elevado no eixo, com conseqüente um baixo consumo de corrente.

2. ACELERADOR ELETRÔNICO

O acelerador eletrônico foi desenvolvido com base em um micro controlador (Caruso e Grandinetti, 2008), que faz a conversão do sinal analógico do potenciômetro em um sinal digital, gerando pulsos de aceleração e desaceleração para o PWM. Esta forma de aceleração além de ser opcional, funcionando em conjunto com o acelerador manual, é semelhante à forma de aceleração dos veículos a combustão, conforme o diagrama da figura 3.

O inversor utilizado converte a corrente de uma bateria em corrente alternada para alimentação do motor AC. A velocidade angular do eixo do motor elétrico, que está acoplado ao sistema de transmissão/câmbio do veículo, é controlada para movimentos suaves, evitando consumo desnecessário de corrente (Consort, 2004).

O sistema de aceleração é composto, além do potenciômetro acoplado na pedaleira do veículo, por uma placa geradora de pulsos de aceleração ou desaceleração, que alimenta a placa inversora, em paralelo com as chaves *push-button*. A vantagem em se ter o acelerador por pedal é que o efeito da mola permite o retorno da pedaleira para a posição de velocidade zero. Ou seja, ocorre uma desaceleração do veículo, resultando em um freio motor que permite a regeneração da energia cinética do veículo, com conseqüente carga da bateria. A Figura 2 apresenta o diagrama de blocos com o controle de velocidade com acelerador eletrônico.

O potenciômetro acoplado à pedaleira possui uma resistência elétrica que varia entre 0 e 220k Ω , inversamente proporcional à variação da tensão de 0 a 5V. A tensão é enviada para a placa geradora de pulsos que foi desenvolvida utilizando um micro controlador Attiny13 da Empresa Atmel Corporation, de baixo custo, alto desempenho, baixo consumo de corrente e com 8 bits [3]. A tensão de operação deste micro controlador varia de 2,7 a 5,5V, e sua frequência máxima é 10 MHz, superior ao cristal de 9,6 MHz escolhido. A programação pode ser em linguagem C.

O programa foi desenvolvido em linguagem C e convertido em linguagem de máquina e, após essa etapa, os dados são enviados, através de comunicação serial, ao micro controlador, onde são armazenados em uma memória flash. Esta memória tem a vantagem de armazenar os dados e, posteriormente, no caso de manutenção do programa, pode-se sobre-gravar, sem a necessidade de substituição do componente. A Figura 3 apresenta a placa geradora de pulsos e o *layout* em face simples.

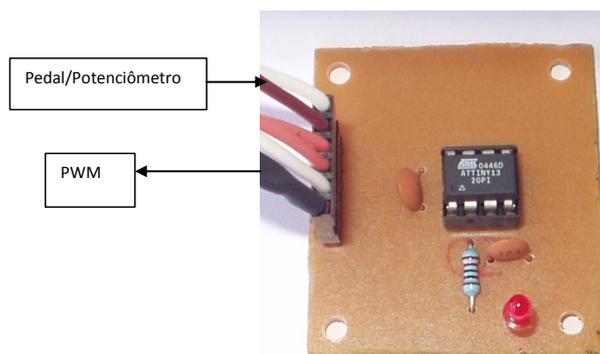


Figura 3 - Placa geradora de pulsos.

O micro controlador verifica se a tensão está em sentido ascendente (0 a 5V) e, nesse caso, envia os pulsos de subida para o PWM, ou se está no sentido descendente (5 a 0V), enviando pulsos de descida, respectivamente para as chaves de aceleração e desaceleração do veículo.

O PWM permite 12 velocidades discretas, e a placa geradora de pulsos obedece a esse limite, tanto na aceleração como na desaceleração (Lucena et. al., 2007) e (Marcelino, 1999).

O intervalo entre um pulso e outro é de, no mínimo, 1s. O período de cada pulso é de 200ms. Esses tempos foram escolhidos para que, nos processos de aceleração ou desaceleração, não existam variações bruscas da velocidade, buscando evitar grandes escorregamentos no motor, com conseqüente consumo desnecessário de corrente elétrica.

O programa do micro controlador está dividido em duas sub-rotinas. Na primeira, são declaradas as variáveis e os dispositivos de funcionamento, onde são definidas as portas de entrada e saída, além de um *looping* contínuo. Na segunda, que esta inserida na primeira sub-rotina, os dispositivos de entrada e saída, o timer e o conversor analógico-digital (ADC) são iniciados. A temporização e a conversão analógico-digital são realizadas quando o micro controlador recebe informações de variações de tensão do potenciômetro, de 0 a 5V. A cada mudança de tensão é gerado um pulso, na porta 2 do micro controlador, ligada à chave de aceleração. O pulso tem duração de 200ms, e o mesmo só é repetido após um segundo. No caso da variação ser decrescente, o pulso é enviado para a porta 1, ligada à chave de desaceleração. O número de pulsos é de no máximo 12, representando as 12 possíveis velocidades do PWM, além do pulso da posição de repouso, conforme as Figuras 4 e 5.

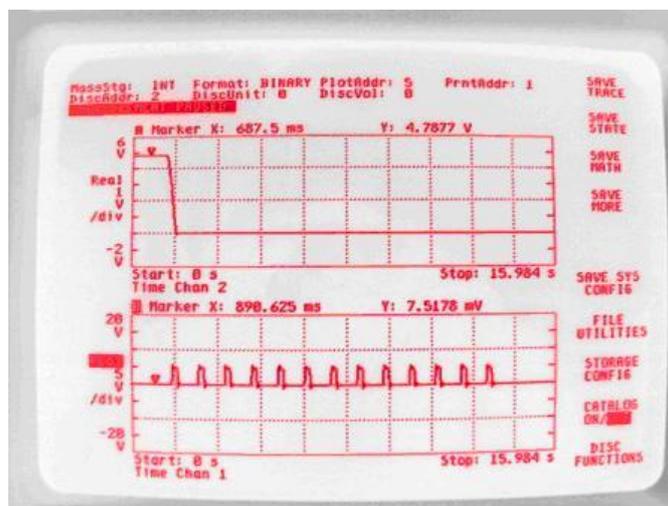


Figura 4. Analisador dos sinais do potenciômetro e dos pulsos durante a aceleração.

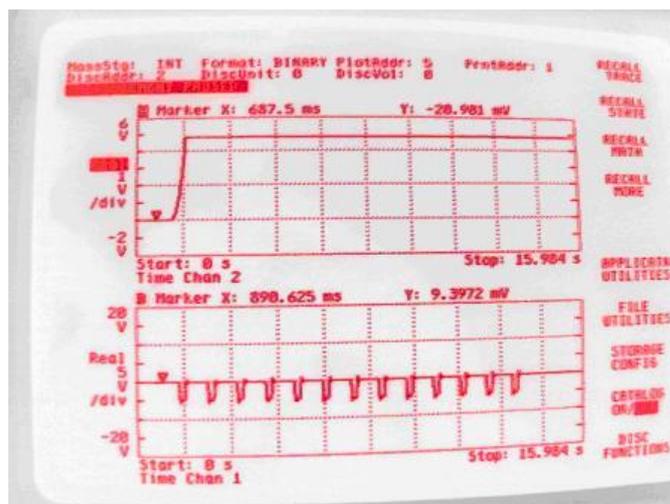


Figura 5. Analisador dos sinais do potenciômetro e dos pulsos durante desaceleração.

3. MOTOR DE INDUÇÃO

Funciona normalmente com velocidade constante, que varia ligeiramente com a carga mecânica aplicada ao eixo. Devido a sua grande simplicidade, robustez e baixo custo, é o motor mais utilizado de todos, sendo adequado para quase todos os tipos de máquinas acionadas encontradas na prática. Atualmente é possível controlarmos a velocidade dos motores de indução com o auxílio de conversor de frequência. Neste projeto utilizou-se um motor elétrico de corrente alternada com a seguinte especificação:

- Marca: Eberle
- Motor de indução trifásico;
- Modelo: AB80 B4-E
- 1,5 CV / 1,1 KW / 1680 RPM / 110 V / 10,7 A / 60 Hz
- Rendimento: 69 %/cos ϕ = 0,78

4. SISTEMA DE TRANSMISSÃO

4.1. Cálculo do Torque Máximo

Para seleção do sistema de transmissão/redutor de velocidade considerou-se: uma velocidade final de 60,8 km/h a partir do repouso; coeficiente de atrito de rolamento de 0,015; tempo total de 300 segundos; peso do veículo, bateria e motorista totalizando 300 kg; raio da roda e pneu de 24 mm; e rendimento do redutor de velocidade 100 % . O torque máximo que o motor deverá fornecer é de 6,4 N.m, pois o controlador de velocidade realizará a variação contínua de velocidade, ou seja, de zero a 1680 rpm:

$$T = \frac{P \cdot 71620}{n} \quad (1)$$

onde: T é o torque (cm Kgf), P é a potência (cv) e n é a rotação (rpm).

De acordo com a especificação do motor, descrita anteriormente, o cálculo do torque, para uma potência de 1,5 CV a uma rotação de 1680 rpm, ocorre substituindo-se os valores na Eq. 1. E tem-se o torque máximo como segue:

$$T_{\max} = \frac{1,5 \cdot 71620}{1680} = 63,94 \text{ cmKgf} = 0,64 \text{ mKgf}$$

4.2. Cálculo da Resistência ao Rolamento

Na figura 6, tem-se um esboço das forças envolvidas durante a movimentação de um automóvel.

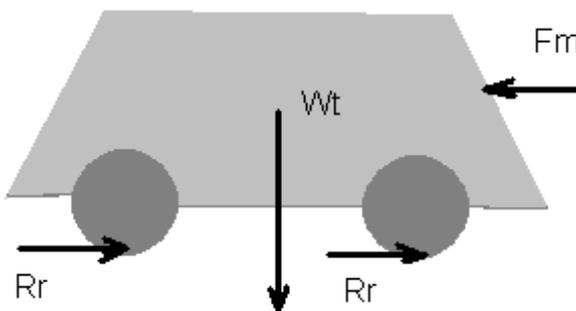


Figura 6. Forças envolvidas

onde: W_t é o peso do veículo, R_r é força de resistência de rolamento e F_m é a força de araste.

A força de resistência de rolamento da Figura 6 é dada por (2), neste caso a força de araste é nula, como segue:

$$R_r = W_t \cdot f \quad (2)$$

onde: W_t é o peso total do sistema (veículo + condutor+bateria).

No cálculo da resistência de rolamento considera-se que os pesos do mini-baja de 150 kgf, do piloto de 80 kgf e do conjunto de baterias de 80 kgf, totalizando 300 kgf, que multiplicado pela aceleração da gravidade, obtém-se um peso total de 3000 N. O valor do coeficiente de atrito (f), tabelado, é dado por 0,015 enquanto que o peso total é igual a 3000 N. Assim, a resistência ao rolamento, correspondente ao valor contrário à força motor, é dada em (3):

$$R_r = 2940 \times 0,015 = 44,1\text{N} \quad (3)$$

A força de contato com o solo, composta pelas forças de aceleração e rolamento é dada em (4):

$$F = m \cdot a + m \cdot g \cdot f \quad (4)$$

onde: m é a massa, a é a aceleração, g é a aceleração da gravidade e f é o coeficiente de atrito.

Substituindo os parâmetros da expressão (2), tem-se a força necessária: $F = 57,98$ N. O torque necessário é calculado pelo produto entre a força necessária e o raio da roda e pneu: $T = 13,91$ N.m.

A velocidade final gera uma rotação na roda de 671,98 rpm na saída do redutor, assim a relação de transmissão da caixa é dada pela razão (i) entre a rotação de entrada e saída do redutor, ou seja: $i = 2,5$.

Esta relação de transmissão multiplicada pelo torque motor tem-se o torque no eixo da roda, 15,88 N.m, conforme torque máximo da Figura 9, maior que o torque necessário para movimentar o veículo, que é de 13,91 N.m.

A Figura 7 ilustra a caixa de redução auxiliar montada no veículo mini-baja para uma relação de transmissão de 2,5 (Shigley, 1984). Esta caixa de redução utiliza duas polias e uma correia trapezoidal de perfil A50. A polia motora possui um diâmetro de 125,6 mm, enquanto a polia movida, que esta acoplada ao eixo da roda do veículo, possui um diâmetro de 305,6 mm. Nota-se que distancia entre centro é de 308,52 mm, espaço suficiente dentro do volume reservado para todo sistema de acionamento e transmissão do veículo.

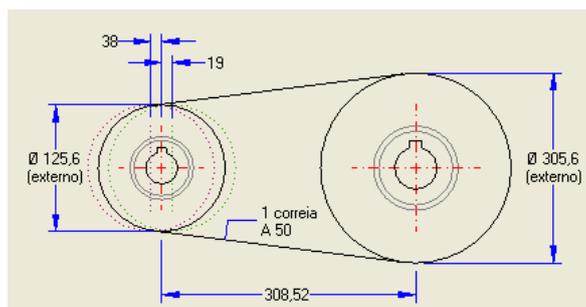


Figura 7. Sistema de transmissão por correia.

Na Figura 8, têm-se os dados da polia acionadora acoplada ao eixo do motor elétrico.

| ● Polia Acionadora | |
|-------------------------------------|--------------|
| Diâmetro | 120 mm |
| Diâmetro Mínimo | 76 mm |
| Rotação | 1680 rpm |
| Potência de Transmissão | 1,5 HP |
| Torque | 0,6483 kgf.m |
| Relação de Velocidades | 1 : 2,5 |
| Polia Acionadora selecionada: OK | |

Figura 8. Polia acionadora.

Na Figura 9, tem-se os dados da polia acoplada ao eixo da roda traseira do veículo, que possui um torque de 15,88 N.m a 672 rpm.

| ● Polia Movida | |
|---------------------------------|-------------|
| Diâmetro | 300 mm |
| Diâmetro Mínimo | 76 mm |
| Rotação | 672 rpm |
| Potência Máxima | 1,5 HP |
| Torque Máximo | 1,621 kgf.m |
| Distância entre Centros | 308,52 mm |
| Polia Movida selecionada: OK | |

Figura 9. Polia movida.

5. RESULTADOS

Utilizou um analisador dinâmico no experimento escolhido para apresentar a validação do projeto. A verificação foi através do tempo e do número de pulsos gerados durante uma aceleração e uma desaceleração, nas quais foram capturados dois sinais. O sinal analógico, proveniente do potenciômetro, e o sinal digital, da placa geradora de pulsos, foram registrados. As imagens registradas nas Figuras 4 e 5 apresentam os 13 pulsos gerados pela placa na aceleração e desaceleração, respectivamente, no espaço de 13s. Mesmo o potenciômetro tendo feito todo o percurso em torno de 250ms, está claro, observando essas figuras, que o VE não tem variação brusca de velocidade. Podendo assim variar a velocidade do motor, por meio do controlador de velocidade, e conseqüentemente atingir a velocidade final de 60,8 km/h com uma relação de transmissão da caixa de 2,5.

6. CONCLUSÃO

O acelerador eletrônico apresentado neste trabalho permite mais uma opção de controle de velocidade para um inversor PWM discreto, utilizado em veículos com tração elétrica. Com um pedal mecânico acoplado a um potenciômetro e a uma mola, a função de freio motor é automaticamente

implementada, permitindo a regeneração da energia durante a desaceleração. O sistema foi construído com componentes de baixo custo, com possibilidade de programação de novas funções, pois utiliza um micro controlador de 8 bits. Não utilizamos um CVT para variar a velocidade do veículo, pois o próprio controlador de velocidade e o redutor de velocidade realizaram a variação de velocidade e o aumento do torque nas rodas necessário para movimentar o veículo.

RERERENCIAS

- Caruso, J. M., Grandinetti, F. J. Sistema de comando e acionamento de um veículo elétrico. **CONEM2008**, Salvador, 2008.
- Consort, T. A. “Simulação e Implementação de um Sistema de Navegação Autônoma de veículos”. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2004.
- Attiny 13V, Features, Atmel Corporation, 2004
- Lucena, S. E., Marcelino, M. A., Grandinetti, F. J. “Low-Cost PWM Speed Controller for an Electric Mini-Baja Type Vehicle”. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, v. XXIX, p. 21-25, 2007.
- Marcelino, M. A. “Controle de Velocidade de Motor de Indução Trifásico Usando Geração PWM Discreta, Otimizada e Sincronizada”. *Revista de Patentes Industriais*, PI9704081-9, v. 1470, p. 1-9, 1999.
- Shigley, J. E. **Elementos de Máquinas**. 3a ed., Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, vols. 1 e 2, 1984.