

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

HENRIQUE KAZUO BICALHO YAMAGUTI  
MARCUS VINÍCIUS VITORATTI DE ARAUJO

**Acionamento dos motores de uma  
cadeira de rodas elétrica de baixo custo**

São Carlos / SP  
Novembro, 2010

HENRIQUE KAZUO BICALHO YAMAGUTI  
MARCUS VINÍCIUS VITORATTI DE ARAUJO

**Acionamento dos motores de uma  
cadeira de rodas elétrica de baixo custo**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à  
Escola de Engenharia de São Carlos da  
Universidade de São Paulo, para obtenção do  
título de Graduação em Engenharia  
Mecatrônica.

Orientador: Prof. Dr. Daniel Varela Magalhães

São Carlos / SP

Novembro, 2010

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTES TRABALHOS, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento  
da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

Y19a

Yamaguti, Henrique Kazuo Bicalho  
Acionamento dos motores de uma cadeira de rodas  
elétrica de baixo custo / Henrique Kazuo Bicalho  
Yamaguti, Marcus Vinícius Vitoratti de Araujo. -- São  
Carlos, 2010.

Monografia (Graduação em Engenharia Mecatrônica) --  
Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São  
Paulo, 2010.

1. Motores elétricos - acionamento. 2. Cadeira de  
rodas. I. Araujo, Marcus Vinícius Vitoratti de.  
II. Título.

## FOLHA DE AVALIAÇÃO

**Candidato(s):** Henrique Kazuo Bicalho Yamaguti  
Marcus Vinícius Vitoratti de Araujo

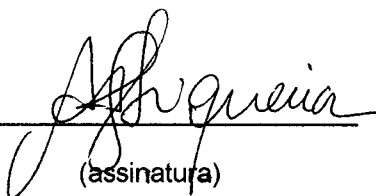
**Título:** Acionamento dos Motores de uma Cadeira de Rodas Elé-  
trica de Baixo Custo

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à  
Escola de Engenharia de São Carlos da  
Universidade de São Paulo  
Curso de Engenharia Mecatrônica

### BANCA EXAMINADORA

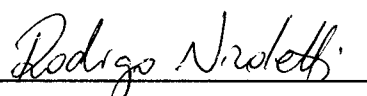
Prof. Dr. Adriano Almeida Gonçalves Siqueira

Nota atribuída: Nove ( 9,0 )

  
(assinatura)

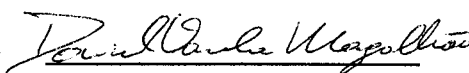
Prof. Dr. Rodrigo Nicoletti

Nota atribuída: Nove ( 9,0 )

  
(assinatura)

Prof. Dr. (orientador) Daniel Varela Magalhães

Nota atribuída: NOVE ( 9,0 )

  
(assinatura)

Média: NOVE ( 9,0 )

Resultado: APROVADOS

Data: 30/11/2010

Dedico este trabalho aos meus amigos e familiares, por terem acreditado em meu potencial e apoiado em todos os momentos.

*Henrique*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço, primeiramente, aos meus pais, Rita e Tsuyoshi, por terem apoiado e participado de todas as minhas decisões.

Agradeço a minha namorada, Juliana, por sempre ter me incentivado e apoiado durante todo esse trabalho.

Agradeço ao Júlio, por ter me proporcionado a oportunidade e o contato com a ideia deste projeto, e ajudado a concebê-la;

Agradeço ao Jorge, técnico do NETeF, que muito nos auxiliou durante todo o processo de execução desse projeto, e sem o qual o mesmo não teria tido bons resultados.

*Henrique*

Agradeço principalmente a Deus pelas oportunidades e amizades colhidas.

Agradeço à minha namorada Carla, pelo carinho e auxílio neste trabalho.

*Marcus Vinícius*

## RESUMO

YAMAGUTI, H. K. B., ARAUJO, M. V. V. Acionamento dos motores de uma cadeira de rodas elétrica de baixo custo. 2010, 36 p. Trabalho de Conclusão de Curso - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP.

Este trabalho mostra o desenvolvimento de todo o *hardware* e *software* necessários para o acionamento de motores de corrente contínua de uma cadeira de rodas elétrica, levando em consideração o lado socioeconômico. O *hardware* subdivide-se em eletrônica de controle, composta principalmente por um microcontrolador e eletrônica de potência, composta pelos transistores, relés, bateria automotiva e motores de corrente contínua. O *software* é responsável pela leitura do comando efetuado pelo usuário em um *joystick* e consequentemente pelo acionamento e reversão dos motores, tomando as devidas precauções.

Palavras-chave: Acionamento, Motor, Cadeira de Rodas



## **ABSTRACT**

YAMAGUTI, H. K. B., ARAUJO, M. V. V. Motor drive for a low cost electric wheelchair. 2010, 36 p. Trabalho de Conclusão de Curso - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP.

This work shows the development of the hardware and the software of a DC motor driver used in a battery-powered, joystick-controlled wheelchair, regarding the socioeconomic side. Hardware is divided into control electronics, consisting primarily of a microcontroller and power electronics, consisting of transistors, relays, automotive battery and DC motors. Software is responsible for reading the commands sent by a joystick and hence for driving and reversal of the motors, taking all the proper safety precautions.

Keywords: Driver, Motor, Wheelchair

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - George Klein em sua invenção.....	11
Figura 2 - Seção transversal de um motor CC.....	12
Figura 3 - Modelo do circuito elétrico de um motor CC.....	13
Figura 4 - Exemplo de PWM com Duty Cycle ( $T_1/T$ ) de 50% .....	14
Figura 5 - Exemplo de PWM resultando em.....	14
Figura 6 - Ponte H simples .....	15
Figura 7 - Joystick de dois eixos tipo “manche” .....	16
Figura 8 - Sinal do <i>joystick</i> saída suavizada .....	17
Figura 9 - Resposta do filtro Bessel passa-baixa à .....	18
Figura 10 - Algoritmo do software de controle .....	19
Figura 11 - Diagrama de Blocos Simplificado do Sistema .....	20
Figura 12 - Amplificador operacional do .....	21
Figura 13 – Placa com FETs, respectivos dissipadores e FET isolado.....	22
Figura 14 - Comparação de tamanho do relé utilizado .....	23
Figura 15 - Alíquota do Simples Nacional para receita bruta de R\$ 1,5 milhão.....	27

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	11
2. MOTORES CC .....	12
2.1. FUNCIONAMENTO E MODELAGEM .....	12
2.2. ACIONAMENTO .....	13
2.3. PROBLEMAS E CUIDADOS.....	15
3. CONTROLE .....	16
3.1. SINAIS DE ENTRADA E SAÍDA.....	16
3.2. FILTRAGEM DO SINAL .....	17
3.3. SOFTWARE .....	18
4. ELETRÔNICA .....	20
4.1. DIAGRAMA DE BLOCOS SIMPLIFICADO .....	20
4.2. ELETRÔNICA DE CONTROLE .....	21
4.3. ELETRÔNICA DE POTÊNCIA.....	22
4.3.1. Transistores .....	22
4.3.2. Relés .....	23
4.3.3. Bateria.....	23
5. CUSTOS.....	26
5.1. CUSTOS DE DESENVOLVIMENTO DO PROJETO.....	26
5.2. VIABILIZAÇÃO .....	26
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	28
REFERÊNCIAS .....	29
APÊNDICE A – DISCRIMINAÇÃO DO CUSTO DO PROJETO.....	31
APÊNDICE B – CÓDIGO-FONTE DO <i>SOFTWARE</i> .....	32
ANEXO A – PROJETO DO FILTRO BESSEL.....	34

## 1. INTRODUÇÃO

Cerca de 2% da população brasileira é cadeirante (IBGE, 2008). Em números, esta porcentagem representa mais de três milhões de pessoas que são vitimizadas com a precariedade da infraestrutura e dos serviços oferecidos, sendo frequentemente sujeitas a grandes esforços físicos que, dependendo de suas limitações, não são possíveis de serem feitos.

Neste contexto, é importante compreender o avanço tecnológico para o aumento da qualidade de vida, como o conceito de *Design* Universal, enfoque no ramo de *design* que propõe que um produto ou serviço esteja disponível para o maior número de pessoas possíveis baseado em sete princípios, dentre eles o princípio do mínimo esforço.

Um dos exemplos deste enfoque é a cadeira de rodas motorizada inventada por George Klein em 1955 (BOURGEOIS-DOYLE, 2004).



Figura 1 - George Klein em sua invenção

Apesar de existir há mais de 50 anos, a cadeira de rodas motorizada é um produto de baixa demanda, baixa acessibilidade e de custo elevado. Segundo Alvarenga (2005), cujo trabalho de mestrado foi o desenvolvimento de um módulo de locomoção, “[...] o preço de uma cadeira motorizada varia de R\$ 4 mil a mais de R\$ 20 mil, dependendo dos recursos oferecidos no modelo, ao passo que as cadeiras convencionais estão na faixa de R\$ 120 a R\$ 4 mil”.

Sendo assim, este trabalho propõe o projeto, a construção e a avaliação dos *hardware* e *software* necessários para o acionamento de uma cadeira de rodas motorizada. Tem como requisito principal o menor custo possível, objetivando-se o aumento da acessibilidade deste possível produto e da consideração do lado socioeconômico implícito em um desenvolvimento tecnológico.

## 2. MOTORES CC

### 2.1. FUNCIONAMENTO E MODELAGEM

Um motor de corrente contínua (CC) é uma máquina geralmente composta pela armadura, que é o rotor e pelo campo, que é o estator. O rotor é a parte girante, constituída de um material ferromagnético envolto em um enrolamento de armadura e pelo anel de comutação. O estator é constituído de material ferromagnético envolto em um enrolamento de baixa potência ou de ímãs permanentes que interagem com o campo gerado pelo enrolamento da armadura, ambos desempenhando a geração de um torque reativo quase constante. O comutador e as escovas tem o papel de inverter o sentido da corrente, evitando, assim, a reversão do torque.

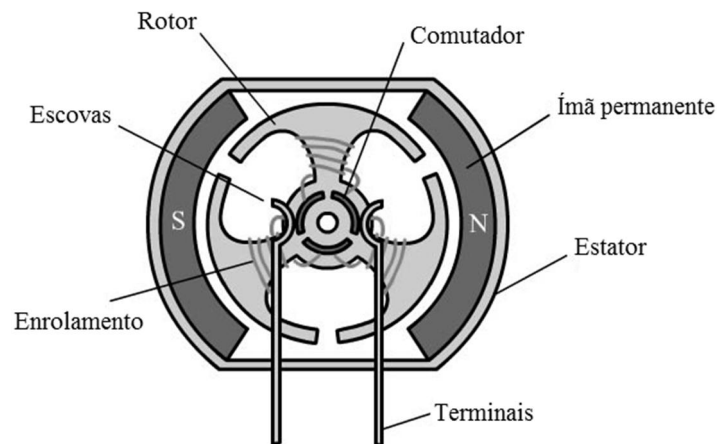


Figura 2 - Seção transversal de um motor CC

O torque para um motor CC pode ser dado pela expressão:

$$T = k_T \Phi_f I_a \text{sen}(\gamma)$$

Sendo  $k_T$  uma constante de torque,  $\Phi_f$  o fluxo magnético gerado pela corrente de campo  $I_f$  e  $I_a$  a corrente da armadura.

A potência mecânica gerada é:

$$P_M = \omega_M T = \omega_M k_T \Phi_f I_a \text{sen}(\gamma)$$

A rotação dos condutores da armadura causa uma força contra eletromotriz  $E_B$ , na direção oposta à rotação da armadura, que é dada pela Lei de Faraday:

$$E_B = k_a \Phi_f \omega_M$$

A potência dissipada pelo motor é:

$$P_d = E_B I_a$$

O modelo do circuito elétrico de um motor CC é ilustrado na Figura 3.

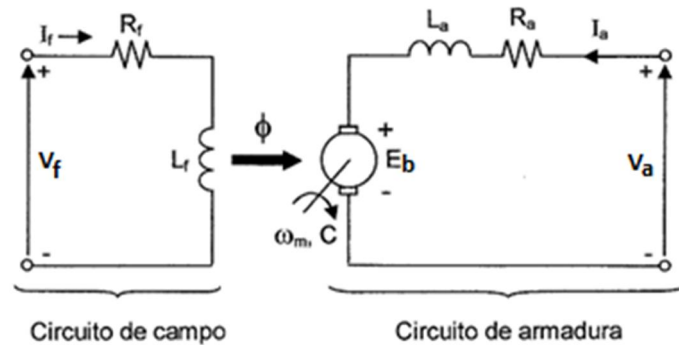


Figura 3 - Modelo do circuito elétrico de um motor CC

Pela Figura 3 e pela Lei de Kirchoff pode-se equacionar:

$$V_a = I_a R_a + L_a \frac{dI_a}{dt} + E_b = I_a R_a + L_a \frac{dI_a}{dt} + k_a \Phi_f \omega_M$$

## 2.2. ACIONAMENTO

Pelo conjunto de equações descritas na seção anterior, percebe-se que a velocidade do motor aumenta à medida que se aumenta a tensão aplicada em seus terminais e que, para que seja efetuada sua reversão, é necessário invertê-la.

Uma maneira bem simples de se controlar uma carga de potência no motor é a utilização de um reostato em série. A variação de sua resistência causa variação na corrente na carga e, portanto, na potência aplicada. A desvantagem se encontra na grande potência dissipada pelo reostato em forma de calor.

Outra forma de maior rendimento é denominada modulação por largura de pulso ou, em inglês, *Pulse Width Modulation (PWM)*. Seu funcionamento é baseado em um chaveamento rápido entre a alimentação e a carga que tem como consequência a alteração do valor médio da tensão e da corrente. Esta frequência de chaveamento geralmente segue o critério de Nyquist, devendo ser mais rápida do que o que pode afetar a carga, por exemplo, 120Hz em um *dimmer*; dezenas de kHz para um driver de motor e centenas de kHz para amplificadores de áudio.

Este método altera a tensão média na carga em uma razão denominada *Duty Cycle*, que é a relação entre o tempo em que a “chave” fica ligada e desligada.

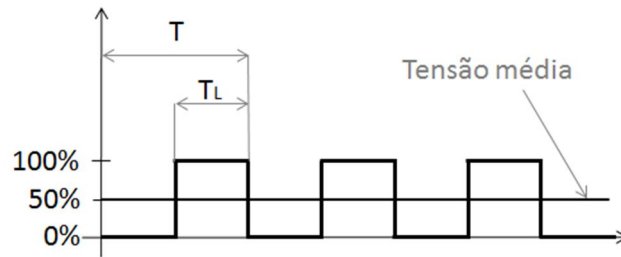


Figura 4 - Exemplo de PWM com Duty Cycle ( $T_L/T$ ) de 50%

É também possível gerar diversas formas de ondas, como senoidais:

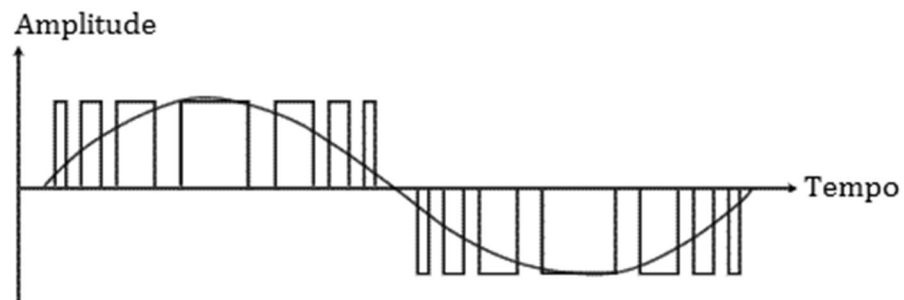


Figura 5 - Exemplo de PWM resultando em uma onda senoidal

Comparado aos outros tipos de acionamento, o PWM é uma forma extremamente econômica de se realizar este tipo de trabalho. Isto se dá ao fato de que, quando a chave está desligada (aberta), a corrente que passa é praticamente zero. Já quando está ligada (fechada), a diferença de potencial é também próxima de zero. Assim, isso significa que a potência dissipada é baixa, em ambos os casos, uma vez que é a multiplicação da tensão e da corrente. Na prática, estas chaves não são ideais, portanto não são capazes de abrir ou fechar em um tempo infinitamente pequeno, o que leva a uma dissipação em forma de calor, porém ainda muito menor do que em um circuito de controle linear equivalente.

Já a reversão do sistema pode ser efetuada por meio de uma ponte H ou de relés. A reversão efetuada pela ponte H evita a geração de tensões negativas e/ou a desconexão dos terminais para sua troca.

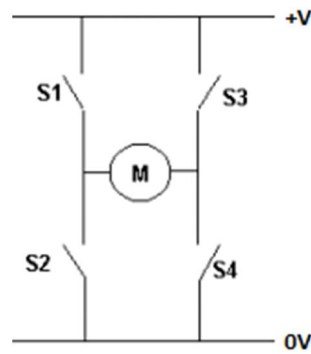


Figura 6 - Ponte H simples

A reversão por relé, por sua vez, é mais simples, bastando receber um sinal de acionamento.

### 2.3. PROBLEMAS E CUIDADOS

Um problema que existe na ponte H é o efeito *shoot-through* que faz com que a bateria sofra um curto-circuito ao acionar duas chaves de um mesmo lado da ponte (efeito decorrente de uma capacitância parasita muito alta no FET), conseqüentemente descarregando uma grande quantidade de corrente, danificando as chaves, exigindo a compra de soluções de proteção.

No caso do relé, quando se inverte a tensão entre os terminais do motor, a corrente é desligada de forma quase instantânea, o que acarreta em uma tensão altíssima gerada por sua indutância, tendo como consequência o aparecimento de arcos voltaicos nos contatos e a diminuição de sua vida útil.

É importante salientar que a reversão do motor, seja ela proposital, para mudança de trajetória, ou acidental, pode causar transtornos ao usuário e, até mesmo, acidentes graves se não houver um bom sistema de controle, devido ao movimento brusco dos motores que causariam trancos em todo o sistema. Sendo assim, o sistema de controle deve efetuar esta reversão de forma suave e, ao mesmo tempo, mais rápida possível, evitando assim o desconforto e o aborrecimento do usuário.

Existe também um problema de corrente reversa, que pode ser causado pela força contra eletromotriz do motor (FCEM), podendo afetar significativamente a eletrônica, comprometendo o microcontrolador e outros componentes. Este assunto será mais bem abordado no Capítulo 4.



### 3. CONTROLE

#### 3.1. SINAIS DE ENTRADA E SAÍDA

O controle do sistema pelo usuário será efetuado por um *joystick* do tipo manche de dois eixos, o que significa na prática dois resistores variáveis e, conseqüentemente, dois sinais que serão enviados ao microcontrolador.



Figura 7 - Joystick de dois eixos tipo “manche”  
utilizado no trabalho

Estes dois sinais correspondem aos eixos vertical e horizontal e trazem informações sobre o desejo do movimento do usuário, compreendendo todas as combinações possíveis entre “frente”, “trás”, “direita” e “esquerda”. Lidos pelo PIC como valores de 0 a 1024, serão convertidos na faixa de -512 a 512, uma vez que se deseja trabalhar o sinal zero como sendo o ponto central. Assim, a interpretação dos sinais será conforme mostrado na tabela a seguir.

Tabela 1 – Interpretação dos sinais dos eixos X e Y

<b>Eixo X</b>	<b>Eixo Y</b>	<b>Horizontal</b>	<b>Vertical</b>
-512 .. 0	-512 .. 0	Esquerda	Trás
-512 .. 0	0	Esquerda	-
-512 .. 0	0 .. 512	Esquerda	Frente
0	-512 .. 0	-	Trás
0	0	-	-
0	0 .. 512	-	Frente
0 .. 512	-512 .. 0	Direita	Trás
0 .. 512	0	Direita	-
0 .. 512	0 .. 512	Direita	Frente

Outro sinal de entrada é do botão de pânico que reduz a velocidade dos motores para zero caso seja acionado.

O microcontrolador desempenhará a função de processar estes sinais de forma a não ocorrer os problemas citados no Capítulo 2 e os enviará aos motores em forma de PWM e sinal digital para reversão.

### 3.2. FILTRAGEM DO SINAL

O processamento do sinal do *joystick* é simplesmente sua filtragem. Sem ela, uma possível reversão, proposital ou acidental, seria instantaneamente executada, causando uma mudança brusca do movimento da cadeira de rodas, o que acabaria causando um extremo desconforto ao usuário e até mesmo acidentes.

O filtro Bessel é considerado o mais recomendado para aplicações em domínio do tempo que requerem mínima distorção para mudanças bruscas, como uma entrada degrau ou ondas quadradas. Deseja-se uma saída suavizada como a da Figura 8.

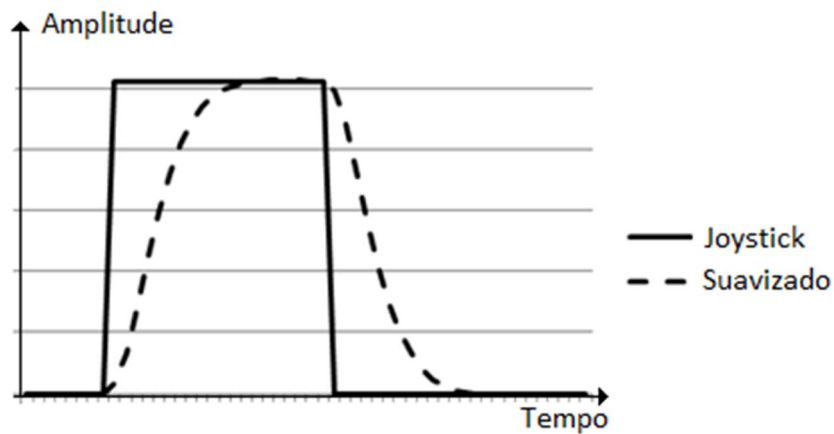


Figura 8 - Sinal do *joystick* saída suavizada

A resposta do filtro Bessel passa-baixa para uma entrada degrau é mostrada na Figura 9.

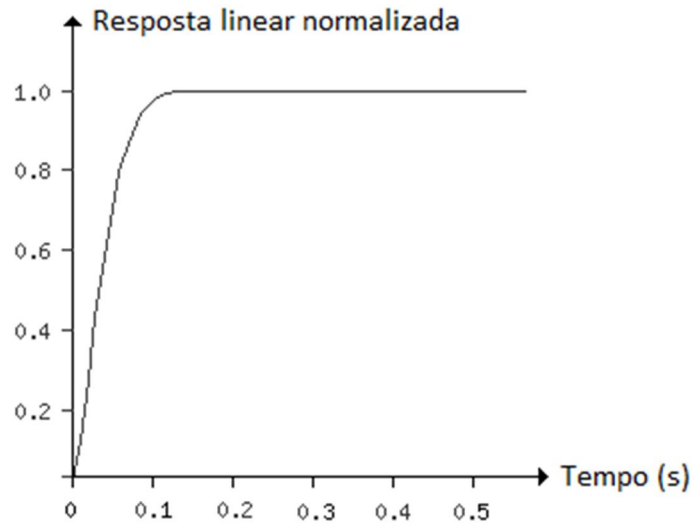


Figura 9 - Resposta do filtro Bessel passa-baixa à entrada degrau ao longo do tempo

### 3.3. SOFTWARE

O *software*, programado no microcontrolador, tem a finalidade de inicializar suas portas e o PWM, realizar conversões analógica-digitais (A/D) dos sinais do joystick, filtrá-los e enviá-los às portas correspondentes dos motores como forma de sinal PWM e relé. Há também um caso emergencial que garante que o sinal do PWM seja zerado se o botão de pânico for acionado, fazendo com que o sistema apenas se movimente por inércia até sua completa estagnação ou até que o botão seja liberado e o usuário movimente mais uma vez o *joystick*.

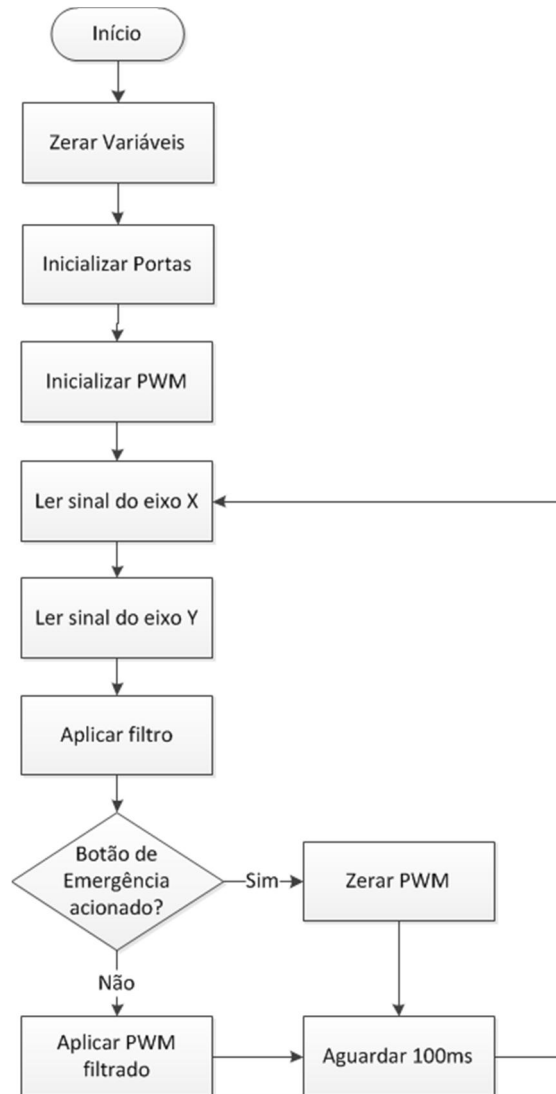


Figura 10 - Algoritmo do software de controle

O *software* é implementado em linguagem C (mais comum entre os microcontroladores modernos) e o filtro tem como parâmetros: tipo passa-baixa de ordem 2, frequência de amostragem 10 S/s, frequência de corte 0,5 Hz conforme mostra o Anexo A.

## 4. ELETRÔNICA

### 4.1. DIAGRAMA DE BLOCOS SIMPLIFICADO

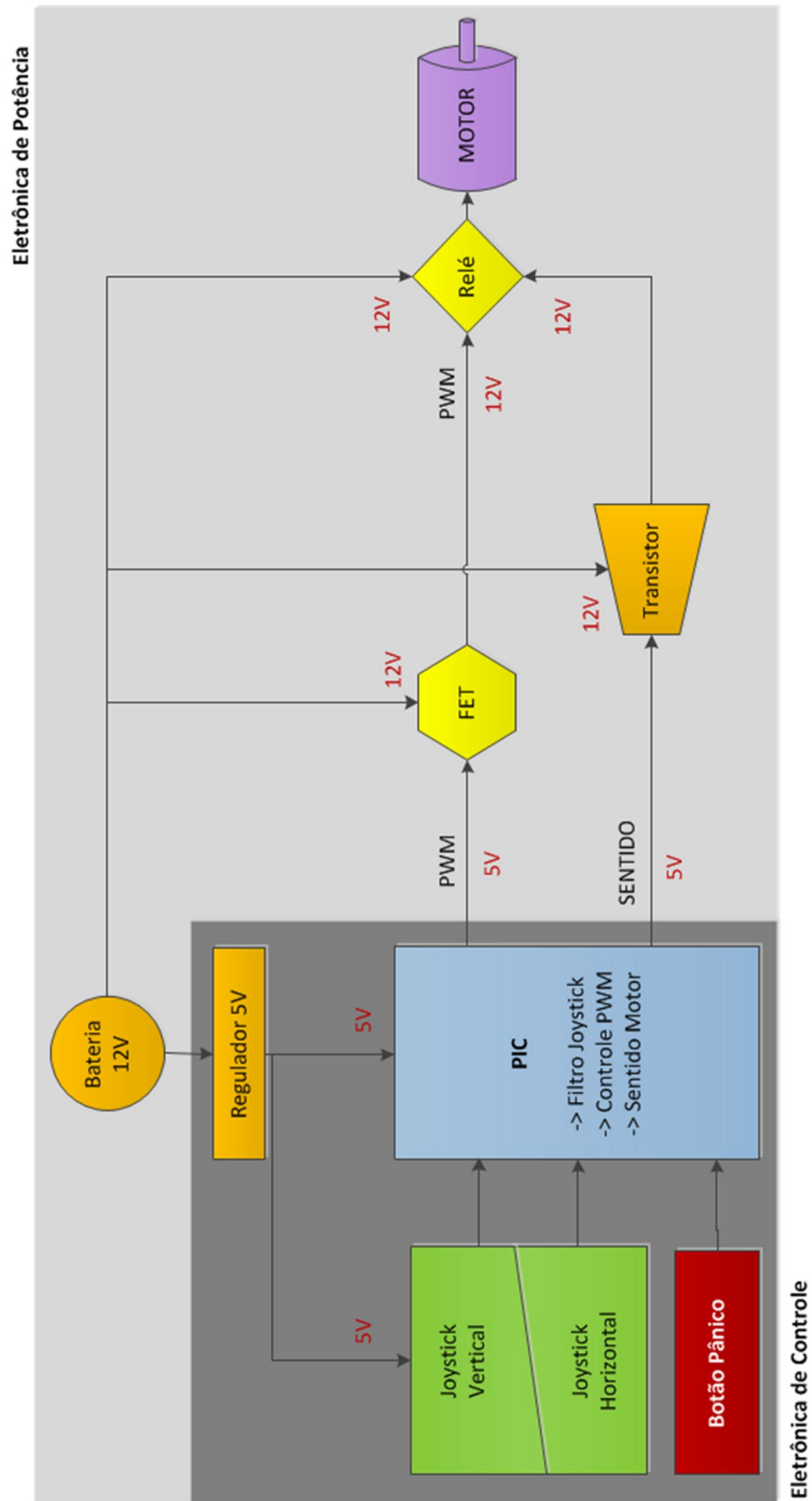


Figura 11 - Diagrama de Blocos Simplificado do Sistema

A eletrônica deste trabalho se divide em duas áreas: eletrônica de controle, composta pelo manete e pelo microcontrolador, na qual pouca corrente é consumida e pouca potência dissipada, e a eletrônica de potência, constituída pelos transistores de efeito de campo, transistores, relés e motores.

## 4.2. ELETRÔNICA DE CONTROLE

Atualmente, existem diversos microcontroladores no mercado que possuem a capacidade de realizar conversões A/D e enviar sinais PWM. É o caso do PIC 16F873A, escolhido como sendo o “cérebro” do sistema. Com a menor memória de programa de sua família (7.2K), possui cinco canais de conversão A/D 10-bit, dois canais PWM, dois comparadores, três portas I/O, comunicação USART e 14 interrupções.

Na Seção 2.2, é discutida a possibilidade de que corrente reversa percorra o circuito e danifique a eletrônica. No caso do microcontrolador, sua consequência pode ser a queima de alguns terminais do PIC, uma vez que sua lógica extremamente complexa o faz servir ao mesmo tempo de entrada e saída, tornando-o sensível. Uma sugestão de proteção para o PIC é a utilização de um amplificador operacional montado como um seguidor de tensão, denominado *buffer*:

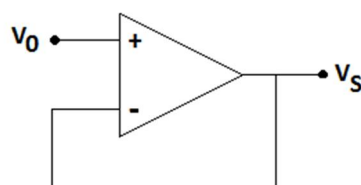


Figura 12 - Amplificador operacional do tipo seguidor de tensão

Este tipo de montagem faz com que  $V_s$  seja igual a  $V_0$  e possa fornecer corrente teoricamente infinita, já que a impedância de saída é zero. A vantagem é que, caso uma corrente inversa percorra o circuito, o amplificador operacional a absorverá antes do PIC.

Um problema que se tem no microcontrolador é que a corrente de saída fornecida é muito baixa para o acionamento de motores do porte desejado. A solução se encontra em realizar este chaveamento em outros componentes, que possam servir como uma ponte para corrente maior. Estes componentes estão descritos a seguir e fazem

parte de um dos grandes desafios da eletrônica: o confronto com a eletrônica de potência.

### 4.3. ELETRÔNICA DE POTÊNCIA

A eletrônica de potência é uma área que se ocupa em obter maior eficiência e qualidade no processamento da energia elétrica. A principal aplicação se encontra em conversores e inversores e cargas de grande potência, através do uso de diodos, tiristores e transistores.

#### 4.3.1. Transistores

Um transistor é basicamente um dispositivo semicondutor que é utilizado para amplificar e chavear sinais eletrônicos e que está presente em praticamente todos os aparelhos modernos. É composto geralmente de três terminais (como é o caso de transistores bipolares), denominados *gate*, *drain* e *source*. Neste trabalho, o transistor será do tipo FET (transistor de efeito de campo, em inglês) usado de modo que uma baixa corrente na base seja suficiente para estabelecer uma corrente maior entre os terminais coletor-emissor.

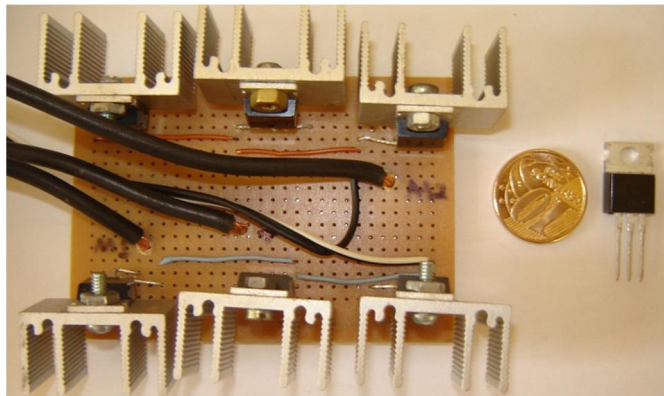


Figura 13 – Placa com FETs, respectivos dissipadores e FET isolado

A proteção dos FETs contra corrente reversa deve ser efetuada através de diodos Schottky, bastante utilizado como retificadores, contra proteções de descargas e *clamping* de tensão.

### 4.3.2 Relés

Um relé é basicamente uma chave acionada eletricamente, utilizado na necessidade de se controlar um circuito por meio de um sinal de baixa potência, servindo para ligar e desligar dispositivos. A maioria dos relés utiliza um eletroímã para operar seu mecanismo. Outros não contem partes móveis, como é o caso dos relés de estado sólido.



Figura 14 - Comparação de tamanho do relé utilizado

Como dito anteriormente, os relés podem sofrer desgaste prematuro caso haja formação de arcos voltaicos, devido à mudança brusca de sentido de giro do motor. Uma forma de evitá-los é a utilização de *snubbers* (circuitos RCD de proteção contra transientes de tensão). Alternativamente, pode-se modificar o *software* de modo a esperar que a tensão do motor zere antes de realizar a comutação.

Em teoria, o chaveamento realizado pelos transistores poderia ser executado pelos relés, já que também possuem a propriedade de transportar altas correntes no sentido indicado por uma baixa corrente. Entretanto, um relé não suportaria a frequência de chaveamento necessária. Assim, o uso dos relés se limitará na atuação da reversão dos motores, algo que não deve acontecer com muita frequência.

O relé escolhido é desenvolvido pela Metaltex com um contato reversível de 15 ampères, selado e de baixo custo. Como a corrente de partida do motor pode chegar a 60A, são necessários quatro relés em paralelo.

### 4.3.3 Bateria

Para o projeto, uma bateria automotiva que tenha um fornecimento médio de corrente (em torno de 60Ah) a uma tensão 12V é recomendada, por ser amplamente difundida e conseqüentemente ter o melhor custo-benefício. Exemplos dessas baterias são as marcas Delphi, Moura e Tudor.



Esta bateria pode fornecer uma energia de:

$$E = P\Delta t = (IU)\Delta t = (I\Delta t)U = (60 \text{ Ah})(12V) = 720Wh$$

Os motores, segundo *Data Sheet*, fornecem, juntos, 600W. Os FETs possuem resistência interna de  $16m\Omega$ . Como são três FETs em paralelo para cada motor, tem-se uma resistência equivalente de  $5,4m\Omega$ . A corrente nominal do motor é 33A. Assim, cada FET conduzirá 11A e, pela equação:

$$Pot = i^2 \cdot R$$

Assim a potência dissipada pela eletrônica de controle é de  $0,65W \times 2 = 1,30W$ . Portanto, a potência total consumida é 601W.

Como as baterias fornecem 720Wh, sua autonomia, em plena carga, será de:

$$\Delta t = \frac{E}{P} = \frac{720Wh}{601W} = 1,2h$$

Sabe-se que velocidade linear é o produto entre a velocidade angular e o raio da trajetória:

$$v = \omega \cdot r$$

A velocidade angular nominal do motor é 2800 rpm. Considerando uma redução 14:1, disponível por uma transmissão por correias em V, tem-se uma rotação na saída do redutor de 200 rpm ou 21 rad/s. Considerando um aro 20", ou seja, calcula-se a velocidade máxima que pode ser atingida:

$$v = 21 \frac{\text{rad}}{\text{s}} \cdot 0,254 \text{ m} = 19,2 \text{ km/h}$$

Entretanto essa velocidade é considerada muito alta e será limitada a sete km/h. O coeficiente de atrito de rolamento para uma cadeira de rodas é 0,015 por pneu (KAUZLARICH, 1985). Estimando uma massa total de 100kg (70kg do usuário e 30kg da cadeira e do *hardware*), calcula-se a força de atrito para os dois pneus:

$$P = m \cdot g = 100kg \cdot \frac{9,81m}{s^2} = 981N$$

*Em equilíbrio vertical,  $N = P$*

$$F_{at} = \mu \cdot N = 0,03 \cdot 981 = 29,4N$$

Assim o torque total mínimo necessário para se movimentar a cadeira de rodas é:

$$T_{min} = F_{at} \cdot r = 29,4N \cdot 25,4cm = 746Ncm$$

O motor, sem redução, é possível de fornecer um torque de até 800Ncm. Entretanto, se utilizará 100Ncm. Logo, é necessária uma redução mínima de 4:1, com um torque total de 800Ncm, já que se utiliza dois motores.

A redução utilizada é, no entanto, 14:1. Considerando uma eficiência de 80%, o torque transmitido pode ser de:

$$T_R = \eta \cdot R_{Red} \cdot T_M - T_{min} = 0,7 \cdot 14 \cdot (2 \cdot 100Ncm) - 746Ncm$$

$$T_R = 1214Ncm$$

Isso dá uma força de:

$$F_R = \frac{T_R}{r} = \frac{1214}{25,4} = 48N$$

Que corresponde a uma aceleração de 0,5m/s<sup>2</sup>. Isto é, o tempo para a cadeira atingir a velocidade máxima de 7 km/h, partindo do estado de repouso, é:

$$\Delta t = \frac{\Delta v}{a} = \frac{7 \text{ km/h}}{0,5 \text{ m/s}^2} = 3,8s$$

A autonomia da cadeira de rodas é estimada em 20km.

## 5. CUSTOS

### 5.1. CUSTOS DE DESENVOLVIMENTO DO PROJETO

O projeto utiliza componentes comumente encontrados no mercado, como cadeira de rodas, motor de corrente contínua, bateria automotiva, *joystick* e componentes eletrônicos. Alguns deles já estavam disponíveis no laboratório, como o motor utilizado no conjunto de arrefecimento do radiador de caminhões Mercedes-Benz, a cadeira de rodas manual, o *joystick* e outros componentes eletrônicos. A necessidade de compra surgiu basicamente para os relés, FETs e PIC e bateria.

O custo de desenvolvimento foi calculado incluindo todos os itens acima acrescentados de um “extra” de 15% que corresponde a peças como acoplador mecânico do motor na cadeira de rodas e a oscilação dos preços.

O custo do projeto é próximo ao da meta de R\$ 1000. A discriminação dos valores pode ser vista no Apêndice A.

### 5.2. VIABILIZAÇÃO

O preço final de venda do produto está sujeito a uma série de impostos, como ICMS, PIS/Pasep, Cofins, IR, CSLL e IPI, além do lucro e dos encargos administrativos. Porém, pode-se considerar a empresa como pequena empresa, com receita bruta anual de R\$1.500.000, participante do Simples Nacional, cuja inscrição implica pagamento mensal unificado dos seguintes impostos e contribuições (Lei nº 9.317, de 1996, art. 3o, § 1o; e IN SRF nº 355, de 2003, art. 5o, § 1o):

- Imposto sobre a Renda da Pessoa Jurídica (IRPJ);
- Contribuição para os Programas de Integração Social e de Formação do Patrimônio do Servidor Público - PIS/Pasep;
- Contribuição Social sobre o Lucro Líquido (CSLL);
- Contribuição para Financiamento da Seguridade Social (Cofins);
- Imposto sobre Produtos Industrializados (IPI);
- Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços (ICMS);
- Contribuição para o Instituto Nacional do Seguro Social (INSS).

Receita Bruta em 12 meses (em R\$)	ALÍQUOTA	IRPJ	CSLL	COFINS	PIS/PASEP	INSS	ICMS	IPI
Até 120.000,00	4,50%	0,00%	0,21%	0,74%	0,00%	1,80%	1,25%	0,50%
De 120.000,01 a 240.000,00	5,97%	0,00%	0,36%	1,08%	0,00%	2,17%	1,86%	0,50%
De 240.000,01 a 360.000,00	7,34%	0,31%	0,31%	0,95%	0,23%	2,71%	2,33%	0,50%
De 360.000,01 a 480.000,00	8,04%	0,35%	0,35%	1,04%	0,25%	2,99%	2,56%	0,50%
De 480.000,01 a 600.000,00	8,10%	0,35%	0,35%	1,05%	0,25%	3,02%	2,58%	0,50%
De 600.000,01 a 720.000,00	8,78%	0,38%	0,38%	1,15%	0,27%	3,28%	2,82%	0,50%
De 720.000,01 a 840.000,00	8,86%	0,39%	0,39%	1,16%	0,28%	3,30%	2,84%	0,50%
De 840.000,01 a 960.000,00	8,95%	0,39%	0,39%	1,17%	0,28%	3,35%	2,87%	0,50%
De 960.000,01 a 1.080.000,00	9,53%	0,42%	0,42%	1,25%	0,30%	3,57%	3,07%	0,50%
De 1.080.000,01 a 1.200.000,00	9,62%	0,42%	0,42%	1,26%	0,30%	3,62%	3,10%	0,50%
De 1.200.000,01 a 1.320.000,00	10,45%	0,46%	0,46%	1,38%	0,33%	3,94%	3,38%	0,50%
De 1.320.000,01 a 1.440.000,00	10,54%	0,46%	0,46%	1,39%	0,33%	3,99%	3,41%	0,50%
De 1.440.000,01 a 1.560.000,00	10,63%	0,47%	0,47%	1,40%	0,33%	4,01%	3,45%	0,50%
De 1.560.000,01 a 1.680.000,00	10,73%	0,47%	0,47%	1,42%	0,34%	4,05%	3,48%	0,50%
De 1.680.000,01 a 1.800.000,00	10,82%	0,48%	0,48%	1,43%	0,34%	4,08%	3,51%	0,50%
De 1.800.000,01 a 1.920.000,00	11,73%	0,52%	0,52%	1,56%	0,37%	4,44%	3,82%	0,50%
De 1.920.000,01 a 2.040.000,00	11,82%	0,52%	0,52%	1,57%	0,37%	4,49%	3,85%	0,50%
De 2.040.000,01 a 2.160.000,00	11,92%	0,53%	0,53%	1,58%	0,38%	4,52%	3,88%	0,50%
De 2.160.000,01 a 2.280.000,00	12,01%	0,53%	0,53%	1,60%	0,38%	4,56%	3,91%	0,50%
De 2.280.000,01 a 2.400.000,00	12,11%	0,54%	0,54%	1,60%	0,38%	4,60%	3,95%	0,50%

Figura 15 - Alíquota do Simples Nacional para receita bruta de R\$ 1,5 milhão

Supondo que 1% da produção seja inutilizável (quebra de estoque e perda irreversível de qualidade), temos que o custo base do produto passa a ser 1% maior, ou seja, R\$ 1005. Considerando 10% de despesas administrativas, 10% de lucro, 10% de mão-de-obra (supondo que a empresa venda em torno de 50 unidades/mês) e que a empresa participe do Simples com alíquota de 10,63% e considerando a isenção de 0,5% do IPI, temos um total de 40,13% de impostos. Assim, o preço de venda do produto pode ser calculado, tomando como base de cálculo o preço de custo:

$$P_v = P_c \frac{(1 + p)}{(1 - i)}$$

Sendo  $P_v$  o preço de venda,  $P_c$  o preço de custo (sem perdas),  $p$  a porcentagem de perdas no estoque e  $i$  o imposto total incidente.

$$P_v = 995 \frac{(1 + 0,01)}{(1 - 0,4013)} = R\$ 1678,55$$

Assim, o preço de venda do produto, arredondado para R\$ 1700, representa uma economia de 57,5% em relação aos menores preços praticados atualmente.

## 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Inicialmente a eletrônica foi montada em uma *proto-board*, com o objetivo de se realizarem testes preliminares. Com auxílio de um osciloscópio, as respostas aos comandos do *joystick* foram testadas e funcionaram corretamente.

A placa de circuito impresso, então, foi confeccionada e os testes novamente foram um sucesso. Um único FET e uma fonte de bancada foram também suficientes para comprovar o sucesso em uma lâmpada de 0,5W. À medida que o valor do *joystick* se alterava, a lâmpada aumentava ou diminuía seu brilho, com a devida suavização decorrente do filtro, provando que o PWM estava totalmente funcional. A próxima etapa consistiu na eletrônica de potência, com a montagem dos bancos de FETs e relés, porém com uma lâmpada de 55W, observando-se o mesmo comportamento.

Um problema enfrentado foi a programação incorreta do *software* correspondente ao motor direito, tendo como consequência o não funcionamento da saída para relé e PWM.

Uma sugestão para trabalhos futuros é a proteção do PIC (*buffer*) e do FET (diodos). Outra sugestão é a construção da ponte H e de suas proteções, inclusive temperatura e sobretensão, ou a utilização de componentes já prontos, como o IR3220, ponte H totalmente protegida, cujas dimensões não ultrapassam dois cm<sup>2</sup> e que custam menos de três dólares. A inclusão da ponte H aumenta consideravelmente a vida útil do sistema, que é, por ora, dependente da vida útil dos relés, a qual é muito baixa.

Entre a eletrônica de potência e a eletrônica de controle se aconselha o uso de um optoisolador, cuja função é proteger um lado do circuito contra mudanças bruscas ou altas tensões provenientes do outro lado, por meio da transmissão de sinais ópticos.

O aprimoramento da interface com o usuário também pode ser realizada, incluindo-se uma tela de LCD, indicador do nível de bateria e mais recursos de controle da cadeira de rodas.

Quanto ao preço de venda do produto, deve-se considerar que este corresponde ao primeiro projeto e poucas unidades, portanto não haveria uma negociação com os fornecedores. Com o acréscimo do volume produzido, o preço de custo se reduzirá, refletindo no preço de venda do produto ou em um lucro maior para a empresa.

Em relação à autonomia, apesar de ser estimada em um pouco mais de uma hora, o chaveamento constante faz com que este tempo seja reduzido. Por outro lado, o controle PWM é um dispositivo de redução de corrente partida. Assim, o uso do controle PWM abaixo do máximo estimado só faz aumentar este tempo.

## REFERÊNCIAS

- BOURGEOIS-DOYLE, R.I. George J. Klein: The Great Inventor. NRC Press, Ottawa, Ontario, Canada, 2004, 289p.
- BOSCH GPDF006KM062H Motor Technical Data, s.n.t
- CARVALHO, G. Máquinas Elétricas - Teoria e Ensaio, 1ª ed, Ed. Érica, São Paulo, SP, 2006, 264p.
- DEDINI, F. G.; ALVARENGA, F. B.; SILVA, L. C. A. E. Modeling of the Powered Module for Motorizing Manual Wheelchairs. SAE Technical Papers, Danvers, MA, USA, v. 2005, n. 1, p. 1-8.
- GHIRARDELLO, A. Apostila sobre Modulação PWM, Curso Técnico em Eletrônica Industrial, s.n.t.
- HAMANAKA, M. H. M. O. Projeto e Desenvolvimento de Circuito de Controle para Cadeira de Rodas, UNICAMP: Campinas, SP, 2002.
- HASSE, P. Overvoltage Protection of Low Voltage Systems. 2nd Edition. The Institution of Electrical Engineers, 2000.
- IBGE. Censo Demográfico 2008. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br>. Acesso em: 20 de outubro de 2010.
- INTERACTIVE DIGITAL FILTER DESIGN em <http://www-users.cs.york.ac.uk/~fisher/mkfilter>. Acesso em 02 de agosto de 2010.
- INTERNATIONAL RECTIFIER IR3220 Fully Protected H-Bridge for D.C. Motor Data Sheet, El Segundo, CA, USA: 2001.
- KAPRA MEDICAL *website* em <http://www.kapra.com.br>. Acesso em 26 de outubro de 2010.
- KAUZLARICH, J. J., THACKER, J. G., Wheelchair tire rolling resistance and fatigue - Journal of Rehabilitation Research and Development - Vol. 22 No. 3 BPR 10-42 p. 25-41, 1985
- KREITH, F. et al. The CRC Handbook of Mechanical Engineering, Boca Raton: CRC Press LLC, 2005.
- METALTEX AT1RC2 Dados Técnicos do Relé Miniatura, s.d.
- MICROCHIP PIC16F87XA Data Sheet, USA: 2003.
- MOTOROLA BC547 Amplifier Transistor Technical Data, Phoenix, AZ, USA: 1996
- PHILIPS SEMICONDUCTORS IRFZ48N Data Sheet, Fev. 2008.

- TEXAS INSTRUMENTS  $\mu$ A7800 Series Positive-Voltage Regulators Data Sheet, Dallas, TX, USA: July 1999.
- WALTER, O. L. Motores de Corrente Contínua, FATEC, Mogi Mirim, SP, s.d.

## APÊNDICE A - DISCRIMINAÇÃO DO CUSTO DO PROJETO

ITEM	FABRICANTE	MODELO	UNIT	QTDE	SUBTOTAL
CADEIRA DE RODAS	BAXMANN	1009	R\$ 280,00	1	R\$ 280,00
PIC	MICROCHIP	16F873A	R\$ 12,00	1	R\$ 12,00
RELÉ	METALTEX	AT1RC2	R\$ 2,20	8	R\$ 17,60
JOYSTICK	LEADERSHIP	RAPTOR	R\$ 13,90	1	R\$ 13,90
MOTOR	BOSCH	GPDF006KM062H	R\$ 175,00	2	R\$ 350,00
FET	INTERNATIONAL RECTIFIER	IRFZ48N	R\$ 3,90	6	R\$ 23,40
TRANSISTOR	FAIRCHILD SEMICONDUCTOR	BC 547	R\$ 0,35	2	R\$ 0,70
RESISTOR		1 k $\Omega$	R\$ 0,05	2	R\$ 0,10
		270 $\Omega$	R\$ 0,05	2	R\$ 0,10
		75 k $\Omega$	R\$ 0,05	1	R\$ 0,05
CAPACITOR		1000 pF	R\$ 0,05	1	R\$ 0,05
		1 $\mu$ F	R\$ 0,05	1	R\$ 0,05
		22 nF	R\$ 0,05	2	R\$ 0,10
DIODO	SILICON RECTIFIER	6A6	R\$ 0,60	4	R\$ 2,40
OSCILADOR	FUJITSU MICROELECTRONICS	CQ 12000	R\$ 1,50	1	R\$ 1,50
REGULADOR DE TENSÃO	TEXAS INSTRUMENTS	UA7805C	R\$ 2,00	1	R\$ 2,00
BATERIA	MOURA	MI60AD	R\$ 200,00	1	R\$ 200,00
EXTRAS			10%		R\$ 91,00
<b>TOTAL APROX.</b>					<b>R\$ 994,95</b>



## APÊNDICE B – CÓDIGO-FONTE DO *SOFTWARE*

```

float ME[3], MD[3], MEF[3], MDF[3];
int JOYX, JOYY, PWME, PWMD, RLEE, RLED;
void InitMain() {
    ADCON1 = 0x80;
    TRISA = 0xFF;
    PORTB = 0x00;
    TRISB = 0xFF;
    PORTC = 0x00;
    TRISC = 0x00;
    Pwm_Init(5000);
}

void main() {
    ME[0] = ME[1] = MD[0] = MD[1] = 0.0;
    MEF[0] = MEF[1] = MDF[0] = MDF[1] = 0.0;
    InitMain();
    Pwm_Start();

    while (1) {
        JOYX = ((int) Adc_Read(1)) - 512;
        JOYY = ((int) Adc_Read(0)) - 512;

        ME[0] = ME[1];
        ME[1] = ME[2];
        ME[2] = ((float)(JOYX+JOYY))/3.423411789e+01;
        MEF[0] = MEF[1];
        MEF[1] = MEF[2];
        MEF[2] = ME[0] + ME[2] + 2*ME[1] - 0.4977439848*MEF[0] +
            1.3809014824*MEF[1];
        PWME = ((int)(MEF[2]/2.0));
        RLEE = (PWME<0 ? 1 : 0);
        PWME = abs(PWME);
        if (PWME>255) PWME = 255;

        MD[0] = MD[1];
        MD[1] = MD[2];
        MD[2] = ((float)(JOYY-JOYX))/3.423411789e+01;
        MDF[0] = MDF[1];
    }
}

```

```
MDF[1] = MDF[2];
MDF[2] = MD[0] + MD[2] + 2*MD[1] - 0.4977439848*MDF[0] +
        1.3809014824*MDF[1];
PWMD = ((int)(MDF[2]/2.0));
RLED = (PWMD<0 ? 1 : 0);
PWMD = abs(PWMD);
if (PWMD>255) PWMD = 255;

PORTC.F4 = RLEE;
PORTC.F5 = RLED;

if (PORTB.F0 == 0)
{
    Pwm1_Change_Duty(0);
    Pwm2_Change_Duty(0);
}
else
{
    Pwm1_Change_Duty(PWME);
    Pwm2_Change_Duty(PWMD);
}
Delay_ms(100);
}
}
```

## ANEXO A – PROJETO DO FILTRO BESSEL

Filter Design Results

<http://www-users.cs.york.ac.uk/~fisher/cgi-bin/mkfsript>

### Filter Design Results

Generated by: <http://www-users.cs.york.ac.uk/~fisher/mkfilter>

#### Summary

You specified the following parameters:

```

filtertype = Bessel
passtype  = Lowpass
ripple    =
order     = 2
samplerate = 10
corner1   = 0.5
corner2   =
adzero    =
logmin    =

```

#### Results

```

Command line: /www/usr/fisher/helpers/mkfilter -Be -Lp -o 2 -a 5.0000000000e-02 0.0000000000e+00
raw alpha1   = 0.0500000000
raw alpha2   = 0.0500000000
warped alpha1 = 0.0504153332
warped alpha2 = 0.0504153332
gain at dc   : mag = 3.423411789e+01 phase = 0.0000000000 pi
gain at centre: mag = 2.420717691e+01 phase = -0.4129462918 pi
gain at hf   : mag = 0.0000000000e+00

```

S-plane zeros:

```

S-plane poles:
-0.3489530204 + j 0.2014681203
-0.3489530204 + j -0.2014681203

```

```

Z-plane zeros:
-1.0000000000 + j 0.0000000000      2 times

```

```

Z-plane poles:
0.6904507412 + j 0.1449888228
0.6904507412 + j -0.1449888228

```

```

Recurrence relation:
y[n] = ( 1 * x[n- 2])
      + ( 2 * x[n- 1])
      + ( 1 * x[n- 0])

      + ( -0.4977439848 * y[n- 2])
      + ( 1.3809014824 * y[n- 1])

```

#### Ansi ``C" Code

```

/* Digital filter designed by mkfilter/mkshape/genocode A.J. Fisher
   Command line: /www/usr/fisher/helpers/mkfilter -Be -Lp -o 2 -a 5.0000000000e-02 0.0000000000e+00 -1 */

#define NZEROS 2
#define NPOLES 2
#define GAIN 3.423411789e+01

static float xv[NZEROS+1], yv[NPOLES+1];

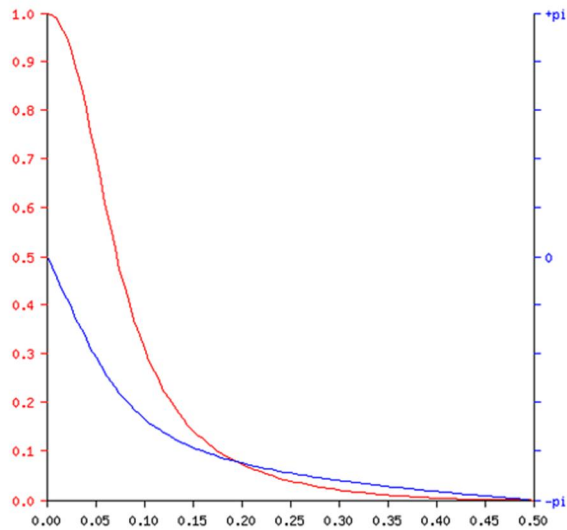
static void filterloop()
{ for (;;)
  { xv[0] = xv[1]; xv[1] = xv[2];
    xv[2] = next input value / GAIN;
    yv[0] = yv[1]; yv[1] = yv[2];
    yv[2] = (xv[0] + xv[2]) * 2 * xv[1]
            + (-0.4977439848 * yv[0]) + ( 1.3809014824 * yv[1]);
    next output value = yv[2];
  }
}

```

Download code and/or coefficients:  

### Magnitude (red) and phase (blue) vs. frequency

- x axis: frequency, as a fraction of the sampling rate (i.e. 0.5 represents the Nyquist frequency, which is 5 Hz)
- y axis (red): magnitude (linear, normalized)
- y axis (blue): phase

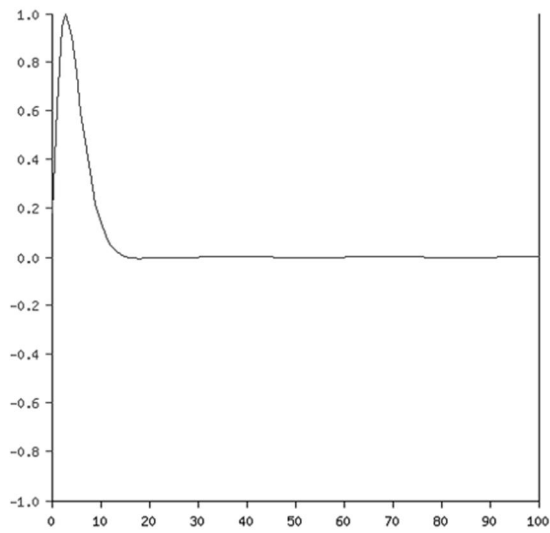


For an expanded view, enter frequency limits (as a fraction of the sampling rate) here:

Lower limit:  Upper limit:  

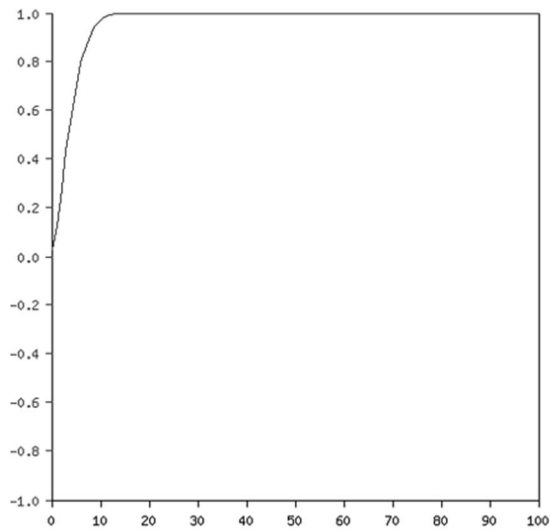
### Impulse response

- x axis: time, in samples (i.e. 10 represents 1 second)
- y axis (red): filter response (linear, normalized)



### Step response

- x axis: time, in samples (i.e. 10 represents 1 second)
- y axis (red): filter response (linear, normalized)



For a view on a different scale, enter upper time limit (integer number of samples) here:

Upper limit:

---

*Tony Fisher* [fisher@minster.york.ac.uk](mailto:fisher@minster.york.ac.uk)