

PROJETO E CONTROLE DE UMA CADEIRA DE RODAS AUTOMATIZADA INTELIGENTE COM SENSORES DE ULTRASSOM

Aluno: Igor Tavares Girsas
Orientador: Marco Antonio Meggiolaro

Introdução

No Brasil, os deficientes com mobilidade reduzida são 27% do total da população de 25 milhões de deficientes físicos, ou seja, cerca de 6 milhões de pessoas, de acordo com o censo do ano 2000.

Atualmente, sistemas de locomoção elétricos para deficientes físicos são extremamente caros, impossibilitando a utilização dos mesmos por usuários de baixa renda, e não tem a mesma praticidade das cadeiras de rodas convencionais dobráveis, o que dificulta a sua utilização por aqueles que necessitam de uma maior flexibilidade no transporte.

Sistemas robóticos podem ser aplicados no controle de transportadores pessoais, como cadeiras de rodas automatizadas. Os usuários de cadeiras de rodas podem usufruir de técnicas de controle inteligente que possibilitem o desvio de obstáculos e evitem terrenos irregulares, executados automaticamente, provendo uma maior segurança e conforto.

Objetivos

O objetivo deste trabalho é projetar uma cadeira de rodas inteligente que, guiada por uma rede de sensores, consiga desviar de obstáculos e impedir ações equivocadas independentemente das ações do usuário. A mesma deve ter um chassi dobrável a fim de dar uma maior flexibilidade na sua utilização diária.

O projeto incluiu: estrutura mecânica, componentes eletrônicos, desenvolvimento de um sistema de controle e simulações no software MATLAB. Este projeto visa obter um custo inferior aos preços comerciais de cadeiras de rodas elétricas, em torno de cinco mil reais, dificultando o acesso aos deficientes em geral.

Metodologia

O desenvolvimento deste trabalho está dividido nas seguintes etapas:

Inicialmente foi realizada uma pesquisa acerca de projetos e estudos relacionados ao tema, a fim de se analisarem os conceitos básicos e maiores dificuldades associados à construção de uma cadeira de rodas elétricas bem como os componentes necessários, tais como motores elétricos, reduções mecânicas e microcontroladores.

Após a escolha dos componentes [2], foi comparado o tipo de controle que melhor se adapta as situações exigidas no cotidiano. Foram propostos dois tipos de controle: PID para situações lineares [1] e lógica Fuzzy para situações não lineares.

Simulações computacionais a fim de testar os parâmetros da cadeira de rodas (rotação da redução, velocidade linear e etc) quando em situações específicas e a resposta ao tipo de controle adotado.

Projeto em ferramenta de CAD do chassi dobrável da cadeira de rodas.

Para fazer o controle da rede de sensores, foi utilizada uma placa *opensource* (ARDUINO UNO) de desenvolvimento de protótipos.

Componentes

- **Cadeira de rodas**

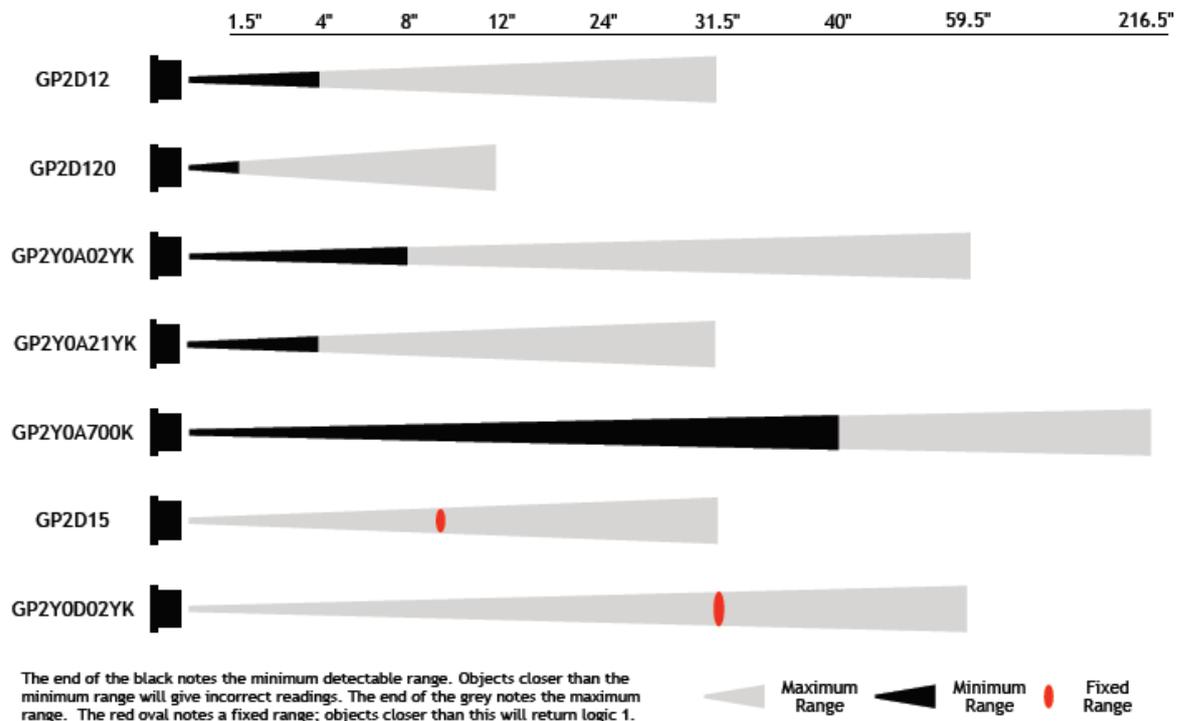
Optou-se por não projetar uma nova estrutura mecânica para a cadeira e utilizar uma disponível no mercado, pois tal construção implicaria num custo elevado. Foi necessário fazer adaptações na estrutura a fim de fixar motores e sensores, suportar as baterias, além do desenvolvimento de redução por correntes para adequação da velocidade e torque da cadeira e da construção de um cubo maciço para as rodas a fim de suportar o torque imposto pelo motor. Devido às características do projeto, era requerido da cadeira de rodas um baixo custo, flexibilidade e fácil adaptação a componentes, sendo escolhido então o modelo “FREE - BAXMANN JAGUARIBE” em alumínio, custando R\$ 499,00.

- **Sensores**

Sensores são dispositivos que recebem e respondem à sinais ou estímulos. Eles podem ser usados para medir quantidades físicas e converter os dados obtidos em sinais elétricos. Existe atualmente uma gama enorme de sensores (térmicos, magnéticos, luminosos, sonares e etc), sendo propostos para esse projeto dois tipos de sensores de distância: sensores de infravermelho (IR) e sensores de ultrassom.

1. Sensores Infravermelho (IR)

Sensores IR medem distâncias através da reflexão do infravermelho - emitindo um pulso baixo na entrada para controle, e posteriormente 8 pulsos de disparo para ler o valor da distância medida – possui alcance entre 10 cm e 5,1 m. As desvantagens no seu uso são o baixo alcance, sensibilidade a luminosidade do ambiente, a cores escuras.



Copyright © 2008 Acroname, Inc. - www.acroname.com

FIG 01: Comparação de sensores IR

2. Sensores Ultrassom

Sensores ultrassom medem distâncias através da reflexão de pulsos supersônicos - emitindo pulsos sonoros e esperando seu eco, em certo range time, para ler o valor da distância medida – Possui alcance entre 2 cm e 6 m. As desvantagens no seu uso são o alto ruído gerado pelo ambiente e a superfícies absorvedoras de som.

Sensor	Communication	Range		Angle*	Echoes**	Ranging Time
		Minimum	Maximum			
SRF01	Serial	0 cm	6 m	45°	One	70 ms
SRF02	I2C / Serial	15 cm	6 m	45°	One	70 ms
SRF04	Digital	3 cm	3 m	45°	One	100 μ s - 36 ms
SRF05	Digital	3 cm	4 m	45°	One	100 μ s - 36 ms
SRF06	Analog	2 cm	5 m	55°	One	70ms - 100 ms
SRF08	I2C	3 cm	6 m	45°	17	65 ms
SRF10	I2C	3 cm	6 m	60°	One	65 ms
SRF235	I2C	10 cm	1 m	15°	One	10 ms
SRF485	RS485 Serial	30 cm	5 m	45°	One	70 ms
SRF485WPR	RS485 Serial	60 cm	5 m	30°	One	70 ms

FIG 02: Comparação de sensores de ultrassom

Apesar de os sensores de IR serem mais baratos – custando em torno de \$15,00 dólares - eles não apresentam, em sua maioria, o alcance necessário (2,5 m). Dentre os sensores procurados (Sharp), o GP2Y0A700K é o que apresenta o maior alcance (5,1 m), porém a distância mínima para seu funcionamento é de 1 metro, afetando a zona de segurança para desvio de obstáculos do cadeirante. Por este fato, foi escolhido para este projeto o sensor ultrassônico SRF06, pois possui alcance e ângulo de captação altos, o que é necessário devido a “zona de segura” para o cadeirante e o posicionamento dos sensores na cadeira. Outro fato para sua escolha foi o preço, que gira em torno de \$31,00 dólares, e que comparado ao modelo inferior (SRF04) cujo preço é próximo (\$29,00), apresenta um alcance superior de 2 metros.

Visando o baixo custo, foi escolhido para a detecção de buracos ou degraus um *kit* de “sensores de estacionamento”, os quais são sensores do tipo 2 especificado a cima. Estes sensores apresentam um alcance de até 0.4 metros e o kit (com 4 sensores) custa em média \$29,00.

- **Baterias**

A bateria é um conjunto de acumuladores elétricos, que possuem a propriedade de converter energia química em energia elétrica. A função de uma bateria é abastecer o sistema elétrico da cadeira de rodas durante seu funcionamento. [8]

Existem diversos tipos de baterias – chumbo-ácido (SLA), Níquel-Cádmio (NiCd), Níquel-Hidreto Metálico (NiMH), Lítio e etc – sendo escolhida para este projeto a bateria SLA. Baterias SLA são formadas por um conjunto de eletrodos a base de chumbo e eletrólito composto de ácido sulfúrico. [4]

A bateria selecionada foi a SLA FLEX 60 AH. Esta bateria foi escolhida devido ao baixo custo (girando em torno de R\$ 120,00), baixo self-discharge (menos de 1% ao dia), baixa resistência interna (podendo gerar altas correntes), alto número de ciclos de recarga e alto tempo de uso. Estas baterias, entretanto, têm a pior relação peso/energia, e taxa de descarga baixa. [4]

Para o valor de tensão de 24 volts do projeto, é necessária a utilização de duas baterias de 12 volts em série, perfazendo o total necessário.

- **Motores de corrente contínua (Motores CC)**

Motor elétrico é uma máquina destinada a transformar energia elétrica em mecânica, tem construção simples, custo reduzido, versatilidade de adaptação a cargas e altos rendimentos. [4], [6]

Motores CC são os motores de corrente contínua. Existem três tipos principais desses motores: de ímã permanente, paralelo e série. Para este projeto foi escolhido o tipo “ímã permanente”, pois são facilmente reversíveis - ao contrário dos de série - e facilmente encontrados no mercado - diferentemente dos paralelos - são formados por um estator (enrolamento de campo ou ímã permanente fixo) e por um rotor (enrolamento de armadura). O enrolamento do rotor gera um campo magnético que em conjunto com o campo do ímã gera um torque no rotor. Para ter um torque constante, os enrolamentos devem ser comutados continuamente, o que é feito pelo comutador do rotor e pelas escovas, presas à carcaça. [4], [6]

Foram propostos para este projeto dois tipos de motores, sendo um motor de limpavidros automotivo (CEP 9 390 453 042) e outro de motorização para bicicletas. Foi escolhido o motor de motorização de bicicletas, pois suas características (corrente em vazio = 2,5 A, corrente com carga máxima 12,5 A, potência = 250 W e torque = 0.8 N*m) [7] se mostram similares a motores utilizados em cadeiras de roda, apresenta maior torque em *stall* (36 N*m contra 10 N*m) e custa metade do valor se comparado ao outro (em torno de \$50,00).

- **Joystick**

Um joystick é um periférico de computador pessoal ou um dispositivo geral de controle que consistem em uma vara vertical na qual os pivôs se aproximam de uma extremidade e transmitem seu ângulo em duas ou três dimensões a um computador.

Optou-se pela utilização do joystick pela facilidade do seu uso, pelo baixo custo e totalidade das cadeiras motorizadas pesquisadas utilizarem este meio para o controle de velocidade e posição. O Joystick escolhido para este projeto foi o GENIUS 31600022100, custando R\$ 35,00.

- **Ponte H**

Ponte H é um circuito electrónico que permite variar velocidades de um motor DC, assim como comutar o sentido de rotação dos motores. [12]

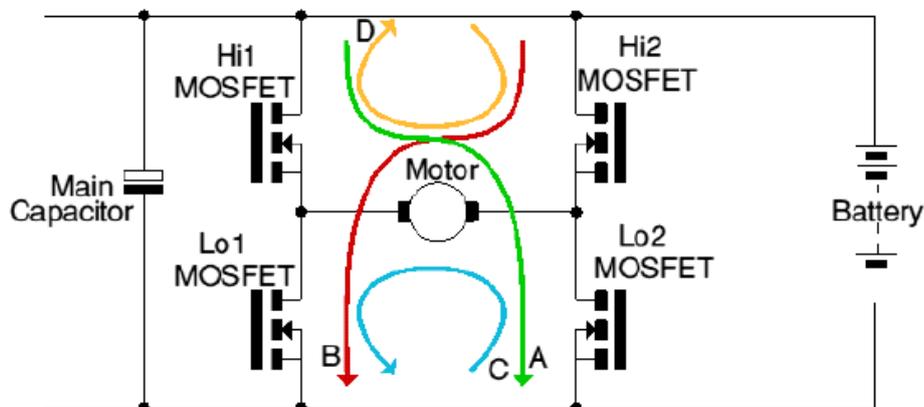


FIG 03: Ponte H e seus modos de funcionamento

Para girar o motor para frente a corrente deve seguir o caminho A, passando pelo MOSFET Hi1, pelo motor e por Lo2. Para girar o motor no sentido oposto, a corrente deve seguir o caminho B, passando pelo MOSFET Hi2, pelo motor e por Lo1.

Para frear o motor os terminais do são curtados (freio motor) e existem duas opções para a passagem da corrente: curva C (passando pelo MOSFET Lo1 e MOSFET Lo2) ou curva D (MOSFET Hi1 e MOSFET Hi2). [4], [6]

A ponte H foi desenvolvida usando MOSFET IRF 1405 que suporta 160 A contínuos (teóricos) e tem um custo de \$1,6 cada.

- **Arduino**

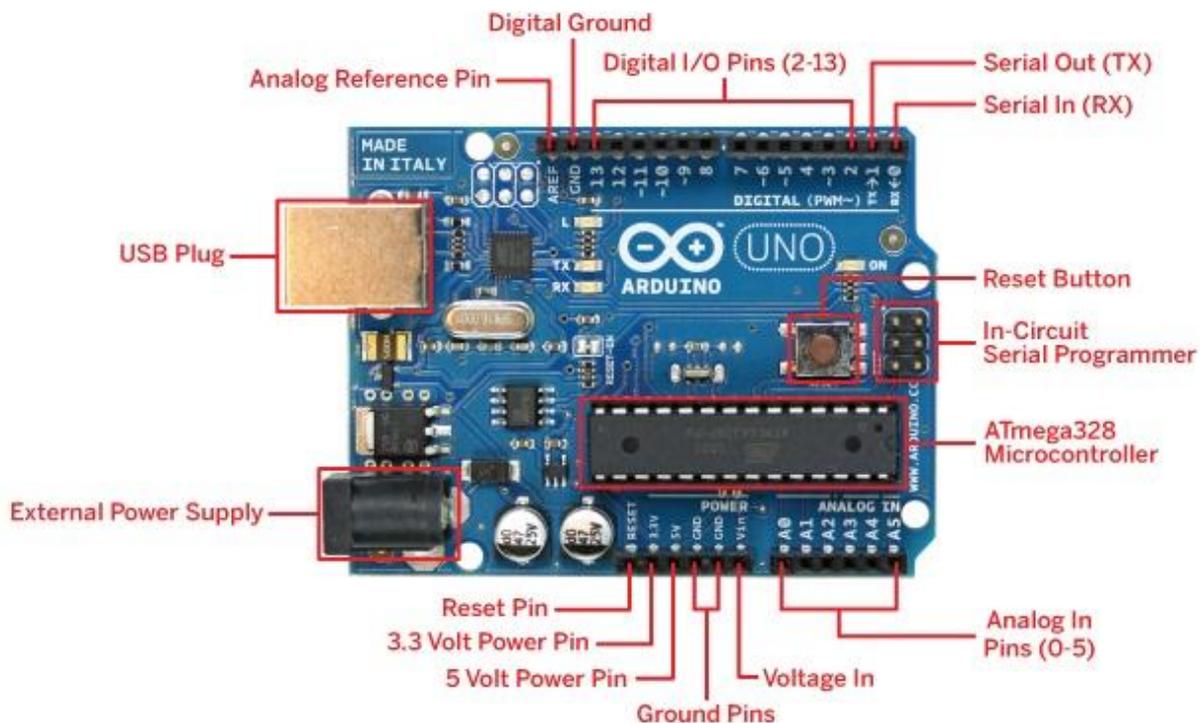


FIG 04: Componentes de um Arduino

Arduino é uma plataforma de hardware livre, utilizando microcontrolador Atmel AVR de placa única, com suporte de entrada/saída embutido e uma linguagem de programação essencialmente em C/C++. O objetivo desta plataforma é criar ferramentas que são acessíveis, com baixo custo, flexíveis e fáceis de usar principalmente para aqueles que não teriam alcance aos controladores mais sofisticados e de ferramentas mais complicadas. [11]

A utilização do Arduino nesse projeto se deu no âmbito de evitar gastos com desenvolvimento de placas eletrônicas de controle e na simplificação da geração do sinal PWM (utilizando sua própria biblioteca de funções) para controle dos motores. A plataforma tem um custo de \$ 30,00.

Este item do projeto foi o único no qual não se visou o menor custo efetivo, mas o aprendizado da plataforma para futuros desenvolvimentos.

Conceitos e técnicas empregadas

- **Veículos de Braitenberg**

São veículos autônomos criados por Valentino Braitenberg em sua obra *Vehicles* [5], estes foram utilizados para simular características psicológicas dos humanos, baseado apenas nas suas ações e reações. A utilização deste conceito se dá na simplificação de comportamentos complexos, pois os mesmos se devem, em sua maioria, a respostas simples a estímulos do ambiente.

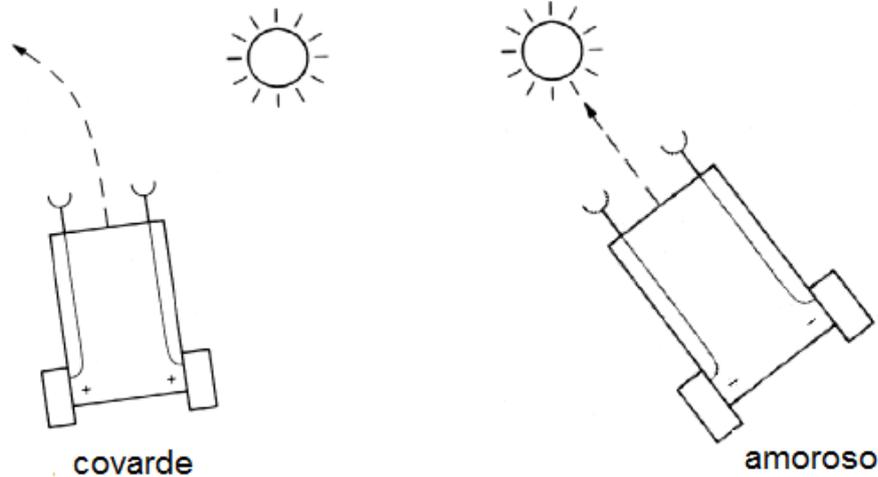


FIG 5 (a): Representação "covarde"

FIG 5 (b): Representação "amoroso"

O comportamento utilizado para este projeto foi o "covarde" (na conexão dos sensores), pois a cadeira de rodas deve "fugir" dos obstáculos que venham estar a sua volta (fig 05 a) ou "amoroso" para se o obstáculo estiver exatamente a sua frente ela parar (fig 05 b).

- **Controle proporcional**

Controle proporcional é um tipo de controle linear (feedback control system) no qual a correção a ser aplicada ao processo deve crescer na proporção que cresce o erro entre o valor real e o desejado. [1]

Esta técnica de controle foi utilizada para controlar a velocidade e posição da cadeira de rodas, alterando sem a interferência do usuário o sinal PWM enviado aos motores, a partir da detecção dos sensores instalados na cadeira.

$$V_{(R1)} = V_{(usuário)} - \left(k_1 \frac{1}{l_1} + k_2 \frac{1}{l_2} + k_3 \frac{1}{l_3} \right) ; \quad V_{(R2)} = V_{(usuário)} - \left(k_3 \frac{1}{l_4} + k_4 \frac{1}{l_5} + k_5 \frac{1}{l_6} \right)$$

FIG 06: Fórmula de controle proporcional

A figura 06 mostra o tipo de atuação do controle proporcional. VR1 é o sinal PWM enviado para a roda direita e VR2 o sinal da roda esquerda. Os valores k1, k2, k3, k4, e k5 são os ganhos proporcionais dos sensores, sendo estes ajustados experimentalmente (sintonia de controle em malha aberta). l1, l2, l3, l4 e l5 correspondem à diferença entre o valor medido e a distância mínima para um objeto à frente da cadeira de rodas ($l = d - d_{\text{mínima}}$). Quando menores forem os valores das diferenças medidas, maior será a atuação do controle na redução da do sinal PWM enviado aos motores.

• **Simulação computacional**

Foi feita apenas a simulação referente ao comportamento dos motores, pois não se tinham dados mais precisos sobre o mesmo, usando o software MATLAB para tais simulações.

As equações do motor elétrico CC são dadas por um circuito RC série:

$$\begin{cases} L \frac{di}{dt} + Ri = V - k_e \omega \\ J \frac{d\omega}{dt} + b\omega = k_e i - T_c \end{cases}$$

Onde L e R são a indutância e resistência do motor, V a voltagem de entrada nos terminais, i a corrente na bobina, k_e é a constante elétrica do motor, ω a velocidade angular, J a inércia do rotor, b o atrito nos mancais e rolamentos e T_c a carga aplicada no eixo em Nm. Como simplificações podemos supor uma indutância pequena ($L \rightarrow 0$), então:

$$i = \frac{V}{R} - \frac{k_e \omega}{R}$$

Se o torque fornecido pelo motor é dado por $\tau = k_e i$, então:

$$\tau = k_e \frac{V}{R} - k_e^2 \frac{\omega}{R}$$

Podemos rearranjar as equações de modo que:

$$\begin{cases} \tau = K_t(i - i_{vazio}) \\ \omega = K_v(V - Ri) \end{cases}$$

Onde $K_t = 1/K_v$ é a constante de torque fornecida pelo fabricante do motor. Considerando a resistência interna como 0.01 Ω , aplicando uma tensão de 24V,teremos a figura a seguir.

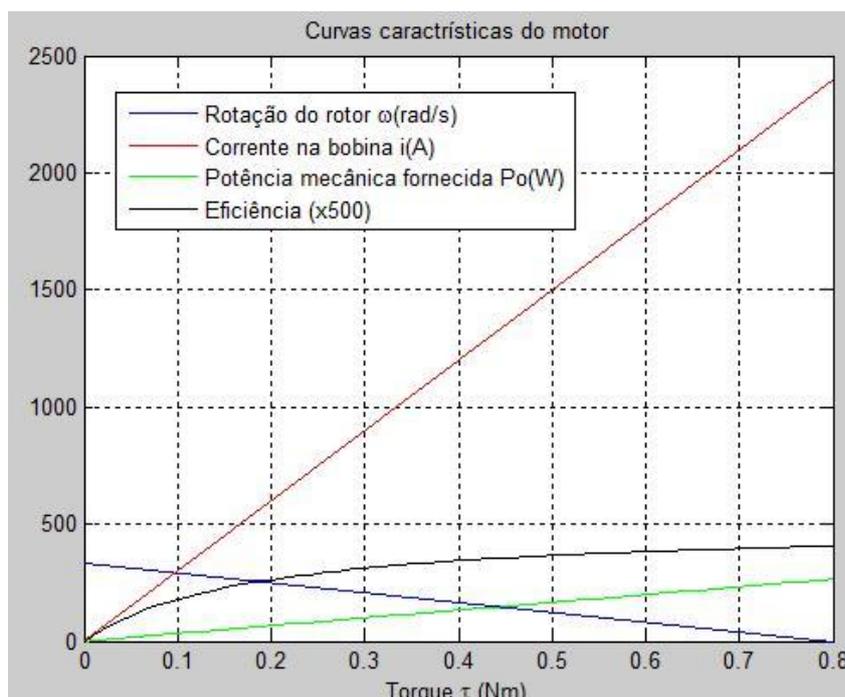


FIG 07: Curvas características do motor

A partir do Gráfico característico foi possível verificar os parâmetros do motor necessários a realização do projeto.

Descrições de funcionamento

O funcionamento da cadeira se dá a partir do movimento do joystick que consequentemente enviará um sinal analógico (pelo fato de ser um joystick resistivo) ao microcontrolador. O sinal analógico recebido pelo microcontrolador é convertido em digital (usando a própria biblioteca de conversão do Arduino) para poder ser utilizado no programa de controle, responsável por gerar os sinais PWM para os motores.

O sinal PWM, porém, não depende exclusivamente da ação do usuário, ele depende da resposta dos sensores espalhados pela cadeira de rodas. A resposta dos sensores de distância entra reduzindo proporcionalmente o sinal PWM, à medida que objetos se aproximam da cadeira, evitando obstáculos, e a resposta dos sensores de profundidade entra cancelando o sinal PWM, impedindo o movimento da cadeira e evitando que o usuário caia em buracos ou em degraus. Vale lembrar que essas atuações são independentes a interferência do usuário.

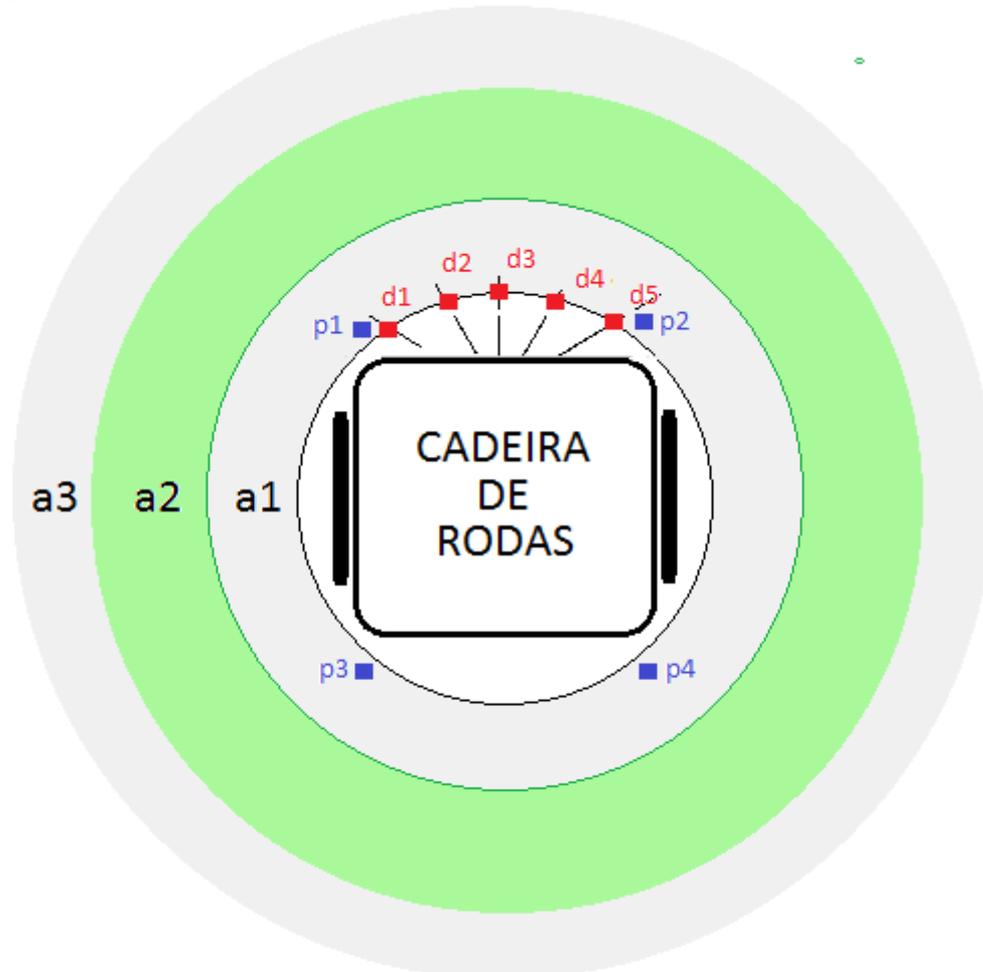


FIG 08: Zona de segurança

A cadeira de rodas está programada para ter uma “zona de segurança” para o usuário. Os sensores de distância (d1, d2, d3, d4, d5) medem quão afastados estão os objetos, tendo defasagem de 30° entre eles (o que está dentro do limite de captação segundo seu Beam Pattern)[10].

Os sensores de profundidade (p1, p2, p3, p4) medem as distâncias da cadeira em relação ao solo à procura de buracos, degraus ou rampas. O controle destes interfere impedindo o

movimento da cadeira quando há saltos bruscos na medida dos valores de profundidade (o que define um possível buraco ou degrau), mas não impedindo o movimento da cadeira numa rampa, pois nesta os valores medidos crescerão e decrescerão suavemente.

A área a1 é a área de afastamento mínimo dos objetos em relação à cadeira de rodas, sendo esta medida estipulada como 0,3 metros. Se algum objeto de aproximar a está distância, a atuação do controle proporcional estará no seu máximo, podendo até impedir a locomoção da cadeira. A área a2 é a área de atuação do controle proporcional da cadeira, onde para qualquer objeto que se encontre nessa região, a cadeira terá seu movimento interferido, sendo esta distância estipulada para o projeto como 2,0 metros. A área a3 é a área onde o controle não atua, pois os objetos ali presentes não representam “ameaça” ao movimento da cadeira ou do usuário.

Custo total do projeto

Para calcular o custo total do protótipo, foi necessário converter alguns valores, pois algumas peças cotadas em dólares americanos. Foi usado o cambio de 1,55 para o dólar.

1. Cadeira de rodas: R\$499,00
2. Sensores de Ultrassom: R\$240,25 (\$155,00)
3. Kit de sensores de estacionamento: R\$44,95 (\$29,00)
4. Baterias: R\$240,00
5. Motores: R\$216,75 (\$139,83)
6. Joystick: R\$35,00
7. Ponte H: R\$62,00 (\$40,00)
8. Arduino: R\$46,50 (\$30,00)
9. Gastos com eletrônicas, conectores e cabos: R\$150,00
10. Gastos com adaptações mecânicas: R\$150,00

Assim, somando todos os valores acima descritos, obtém-se um custo total de R\$1693,45.

Para efeitos de comparação, retirando-se os valores referentes aos sensores, a confecção de uma cadeira de rodas motorizada custaria R\$1408,25. Esse valor é extremamente inferior a cadeiras de rodas motorizadas convencionais. Tendo como exemplo o modelo “Seat Mobile SM1 Motorizado”, o qual teve o menor preço de todas as cadeiras motorizadas pesquisadas, este custa R\$6389,90 podendo passar de R\$6800,00 em algumas lojas. Não se limitando aos modelos mais básicos, existem cadeiras motorizadas as quais podem passar dos R\$18000,00.

Conclusões e Sugestões de Trabalhos Futuros

A cadeira atendeu às especificações do projeto, conseguindo o seu modelo, desviar automaticamente de obstáculos que venham a se impor na trajetória determinada pelo usuário, impedindo que o mesmo caísse em buracos no trajeto ou se locomova por locais inadequados para cadeirantes (degraus).

O desenvolvimento deste projeto mostra que é possível à construção de uma cadeira de rodas motorizadas de baixo custo. A para confecção do projeto se mostrou mais de quatro vezes inferior ao preço do modelo comercial mais barato no mercado brasileiro. Esta grande redução no preço auxiliaria o acesso dos deficientes físicos com menores recursos a essa tecnologia.

A implementação do chassi dobrável em “X” e das conexões de fácil remoção foram fundamentais para dar maior praticidade no transporte da cadeira de rodas, sendo necessário

apenas remover as baterias, retirando seus conectores, para poder dobrar e guardar a cadeira de rodas em um espaço reduzido.

A técnica de controle proporcional se mostrou eficiente no desvio do modelo de obstáculos. Notou-se, porém, um movimento brusco no desvio de objetos próximos, o que pode ser melhorado com a implementação de um controle melhor, por exemplo PID ou *Fuzzy*, a fim de suavizar este movimento.

Sugere-se, como melhorias para trabalhos futuros:

1. Desenvolvimento de uma caixa de redução compacta para melhor adaptação a cadeira de rodas convencional.
2. Desenvolvimento de um modelo de cadeira de rodas que se adeque melhor as necessidades deste tipo de projeto a fim de reduzir as adaptações ou adequações feitas em modelos comerciais.
3. Utilização de freios regenerativos, visando aumento na vida útil da bateria e na autonomia da mesma, que pode chegar a 20%.
4. Simulação computacional do controle utilizado para melhor dimensioná-lo e calibrá-lo.

Referências

- 1 - KATSUHIKO, Ogata . **Engenharia de Controle Moderno** - 4ª Edição 2003. Editora: Prentice Hall - Br.p. 557-610
- 2 - SEDRA / SMITH, Adel Sedra / Kenneth Smith. **Microeletrônica** – 5ª Edição 2007. Editora: Prentice Hall - Br.
- 3 - GERE, James M. **Mecânica Dos Materiais** - 5ª Edição 2007 .Editora: Cengage Learning..
- 4 - MEGGIOLARO, Marco Antonio. **RioBotz Combat Robot Tutorial**, v2.0, agosto de 2009.
- 5 - BRAITENBERG, V. **Vehicles: Experiments in syntecic psychology** - (1984). Editora: MIT Press.
- 6 - MAIMON, Felipe. **Projeto de um sistema eletrônico para o controle de motores de alta potência por PWM**, 2004. Trabalho de fim de curso.
- 7 - http://www.dynamiccontrols.com/downloads/cat_view/46-product-catalogue
- 8 - http://www.bosch.com.br/br/autopecas/produtos/baterias/o_que_e.htm
- 9 - <http://www.acroname.com/robotics/info/articles/devantech/srf.html#e11>
- 10 - <http://www.acroname.com/robotics/parts/R335-SRF06.html>
- 11 - <http://www.vivaolinux.com.br/artigo/Arduino-Crie-o-seu-proprio-robo-ou-sensores-inteligentes>
- 12 - <http://lusorobotica.com/index.php?topic=262.0>