

DESENVOLVIMENTO DE VEÍCULO AUTÔNOMO- INTELIGÊNCIA PERIFÉRICA, SENSORIAMENTO E SISTEMAS DE EMERGÊNCIA

Riccardo L. Delai¹ ; Alessandra Dutra Coelho² ; Paulo de Tarso Castro Mazzeo¹

¹ Aluno de Iniciação Científica da Escola de Engenharia Mauá (EEM/CEUN-IMT);

² Professora da Escola de Engenharia Mauá (EEM/CEUN-IMT).

Resumo. *Este trabalho apresenta a construção de um chassi robótico, com enfoque principal no desenvolvimento de um sistema eletrônico para controle de movimentação de um veículo autônomo, através do controle PWM de motores de corrente contínua e de pontes transistorizadas. A solução elaborada é baseada em um sistema microcontrolado, que responde a comandos enviados via USB por um computador, de forma que o veículo possa ser comandado de maneira transparente, independente da implementação a nível de circuito.*

Introdução

Toda tarefa perigosa, tediosa, repetitiva, árdua ou de outra forma desinteressante é passível de automatização, com o objetivo de facilitar o trabalho de quem depende delas. Por isso é cada vez mais comum ver robôs, autônomos ou não, atuando em zonas de perigo (por exemplo, desarmando bombas ou visitando zonas radioativas), no trabalho repetitivo (por exemplo, em linhas de montagem) e de precisão.

Assim, não é de se surpreender que pesquisas recentes estejam buscando alternativas robóticas para tornar os automóveis cada vez mais automatizados. Sistemas de auxílio ao motorista estão cada vez mais difundidos e acessíveis em veículos comuns, como o auxílio de estacionamento. Ainda mais inovadores são os trabalhos de substituição completa do motorista, tornando o veículo inteiro autônomo (Reinholtz et al., 2007), (Kornhauser et al., 2007), (Montemer et al., 2007).

Inspirado nestes últimos, este trabalho trata do desenvolvimento de uma base robótica, em menor escala, para um veículo autônomo. Como base, foi utilizado um pequeno veículo elétrico, originalmente com comandos mecânicos, que foi adaptado para responder a um controle externo de uma inteligência central embarcada no veículo, que envia, via USB (*Universal Serial Bus*), comandos dentro de um protocolo estabelecido.

Chassi robótico

Conforme avança a capacidade robótica, tanto mecânica quanto eletrônica, vê-se mais funções assumidas por sistemas automatizados. E o interesse é torná-los cada vez mais autônomos e robustos, de modo que necessitem do mínimo possível de controle ou correção humana. Assim, os robôs devem ser mais capazes de interfacear com o ambiente ao redor, através de sensores e atuadores, da forma mais rápida e precisa possível.

Em particular, um campo de crescimento em pesquisa na robótica autônoma é a robótica móvel, que tem sido bastante beneficiada pela miniaturização eletrônica e mecânica. Um robô móvel é aquele que se locomove por meios próprios livremente, através de rodas ou pernas. Enquanto a robótica fixa se consolidou na indústria como maquinário de produção, a móvel ainda se depara com desafios que dificultam sua implementação prática.

A própria estrutura robótica deve portar todos os elementos necessários para seu funcionamento, desde os básicos como uma fonte de energia (geralmente uma bateria) e motores para locomoção, até os mais específicos que dependem da função. Assim, um fator essencial para o bom desempenho de um robô móvel é uma base mecânica sólida e robusta, capaz de suportar os impactos e o peso previstos em sua utilização. Além disso, esta deve ter formato que possibilite a fixação adequada dos atuadores e sensores que definem a funcionalidade do robô, protegendo os mais sensíveis.

Outro parâmetro limitante é a autonomia. Por ser móvel, o robô não pode contar com uma infra-estrutura de fornecimento de energia, ficando limitado às baterias que puder carregar. Com isso, é necessário encontrar uma relação de custo/benefício entre o peso das baterias e a energia que estas podem fornecer, que é proporcional à autonomia do veículo. Por causa disso, todos os circuitos utilizados devem ser econômicos em consumo de bateria.

A montagem também deve ser firme e resistente, para suportar impactos mecânicos. Um fio que se desprenda em uma colisão pode destruir todo um circuito. Também por isso, o uso de relés está descartado, dado o *stress* mecânico envolvido. Os circuitos também devem ser compactos de modo que caibam dentro da estrutura.

Em resumo, robôs móveis devem ser compactos, ter mecânica robusta para suportar impactos, serem capazes de carregar seu próprio peso e apresentar boa fixação de todas as partes, além de uma boa autonomia de bateria. Esses fatores compõe um chassis robótico, sobre o qual são adicionadas as funcionalidades de interesse.

Controle de motores

Na robótica móvel, o foco principal está no controle de motores de corrente contínua (CC), já que a fonte de energia é ordinariamente uma bateria de corrente contínua. Para este tipo de aplicação, tipicamente utiliza-se a topologia de ponte H (esquematizada na Figura 1), que possibilita girar o motor em ambos os sentidos, através do fechamento simultâneo das chaves S1 e S4 ou S2 e S3. A velocidade do motor pode ser controlada através de um sinal PWM aplicado à ponte, para o qual o motor responderá apenas ao nível médio se a frequência do PWM for suficientemente alta. A largura do pulso controla a energia que é enviada e as inércias mecânicas mantém a rotação entre os pulsos, de forma que apenas o nível médio atue e a velocidade de rotação seja praticamente constante.

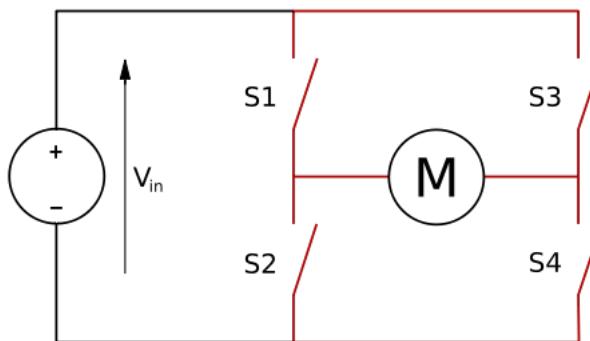


Figura 1: Topologia de uma ponte H

Sensores

Através do controle de motores e da construção de um chassis nos moldes do descrito acima, é possível criar um veículo que se desloca pelo ambiente. No entanto, isso não é suficiente para a maioria das aplicações, já que esta movimentação é cega, pela ausência de sensores para interpretar o ambiente.

É interessante que o robô perceba o ambiente ao redor, mas sem tocá-lo (sem colisão). Para tal, há diversos tipos de sensores que podem ser utilizados, que em sua maioria servem para medir distâncias e identificar objetos no caminho do veículo. Particularmente na aplicação de veículos autônomos, os sensores mais utilizados são radares (Kornhauser et al., 2007) e *scanners* laser (Habermann, 2010), (Reinholtz et al., 2007). Mas estes apresentam a desvantagem de serem relativamente grandes e demandarem esforço computacional elevado para serem processados e auxiliarem na navegação, além de serem sensíveis e frequentemente precisarem de características eletrônicas (níveis de tensão e corrente) e mecânicas (características de montagem) incompatíveis com um protótipo em escala reduzida.

Há sensores mais simples e altamente miniaturizados, mais adequados para a escala. Entre eles, cita-se os sonares miniaturizados e os sensores de infra-vermelho. O funcionamento de ambos é bastante semelhante, o primeiro utilizando um sinal sonoro e o segundo luminoso, mas fora da faixa visível. Estes operam emitindo um sinal de frequência conhecida que se propaga no meio. Se este sinal encontrar algum objeto que o reflita, a reflexão será captada. A distância pode ser estimada através do tempo que o sinal leva para retornar, no caso do sonar. No caso do sensor infravermelho, a luz é emitida obliquamente, a característica de retorno medida é o ângulo de incidência, através do afastamento horizontal entre transmissão e incidência (Figura 2).

Prevenção de acidentes

Com o aumento da responsabilidade do maquinário autônomo, aumenta também a responsabilidade de seus projetistas, que devem garantir sua perfeita funcionalidade e evitar desastres causados por falhas de engenharia. O aumento da força, peso, tamanho e velocidade dos

robôs autônomos torna necessária a capacidade de intervenção humana em casos de descontrole.

No caso de uma pane, por questões de segurança, não é recomendável que alguém se aproxime do aparelho para intervir. Assim, a proteção de emergência deve ser feita a distância.

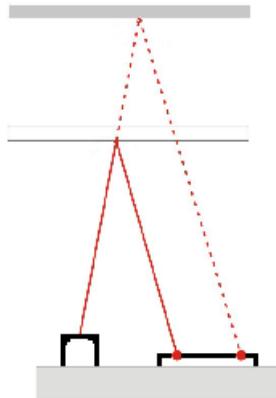


Figura 2: Funcionamento de um sensor infra-vermelho, mostrando duas situações (linhas cheia e pontilhada)

Materiais e métodos

Como plataforma base para a criação do chassis robótico, utilizou-se um pequeno veículo elétrico, com capacidade de carga de até 30kg e dimensões de 100x66x65cm, visto na figura 3.

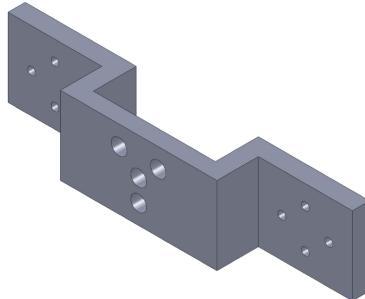
A direção, originalmente mecânica foi substituída por uma adaptação (que pode ser vista na Figura 3) de um motor de limpador de para-brisa veicular. Este tipo de motor foi escolhido por apresentar alto torque, proporcionado por uma forte redução mecânica, capaz de girar a direção sem maiores construções mecânicas. Utilizou-se um suporte de sustentação (figura 4a) e de um ajuste para o encaixe no eixo original (Figura 4b), ambos desenvolvidos especificamente para a aplicação.



Figura 3: Visão frontal do veículo

A bateria original do veículo foi mantida exclusivamente para o motor de tração, que também não foi alterado. Para toda a eletrônica e para o motor de direção utilizou-se uma bateria LiFePo4 A123 (lítio, ferro polímero) de 2300mAh, fornecendo 13,2V. Esta bateria apresenta uma condição de descarga contínua e pulsada máxima boa para as dimensões, de 120A durante 10s ou 70A continuamente, em um pacote de 105x66mm.

A tensão fornecida é regulada para 12V e para 5V para alimentar a eletrônica presente no veículo. Para o motor de direção, a tensão integral de 13,2V é fornecida. Como este é acionado apenas para esterçar o volante (pouca carga), e não continuamente, a corrente puxada da bateria não é tão elevada a ponto de descarregá-la rapidamente, dando uma autonomia de algumas horas de operação contínua ao veículo.



(a) Suporte do motor



(b) Bucha para o eixo

Figura 4: Adaptações mecânicas para a direção

Para controlar os motores de tração e direção utilizou-se a topologia de ponte H como mostrado na Figura 1. Considerando a inconveniência da utilização de relés em circuitos móveis e sujeitos a vibrações, optou-se por uma configuração com transistores MOSFET (*Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor*, transístor de efeito de campo de óxido metálico), que apresentam maior capacidade de corrente e menor dissipação em comparação com os equivalentes BJT (*Bipolar Junction Transistor*, transistor de junção bipolar), além de já implementarem um diodo reverso DMOS, que os protege contra picos de tensão contra-eletromotriz provenientes do chaveamento do motor.

Para o controle de direção utiliza-se o circuito da Figura 5, sendo que a Figura 5a mostra o circuito lógico que evita que a ponte seja acionada em curto, como se as chaves S1 e S2 ou S3 e S4 fossem acionadas simultaneamente na Figura 1, e também controlam o sentido de rotação dos motores. Os transístores BJT Q9 e Q10 garantem que a tensão no *gate* dos FETs seja suficientemente alta para polarizá-los na região de triodo, com máxima passagem de corrente e mínima dissipação térmica (Sedra and Smith, 2008).

A corrente de pico do motor de tração do veículo foi medida próxima de 10A. Assim, foi necessário utilizar transístores MOSFET compatíveis com os níveis de tensão e corrente utilizados. Além disso, em caráter de teste, foram inseridos *snubbers*, como recomendado em (de Lucca, 2011), para amortecer a tensão sobre estes durante o chaveamento. Os *snubbers* foram colocados em apenas dois transístores para verificar sua influência na temperatura de operação dos FETs, mas nenhuma mudança pode ser medida em relação à semi-ponte sem amortecimento.

Como a corrente de trabalho deste circuito é elevada, foi necessário utilizar uma placa de circuito impresso, ao invés de placas-padrão convencionais, com trilhas de dimensão compatível com a corrente (foram utilizadas trilhas de 2mm).

A ponte de controle do motor de direção funciona de maneira análoga e está exposta na Figura 6. Foi possível utilizar transístores com especificação mais brandas, já que a corrente do motor da direção é da ordem de poucos amperes (menor que 2A, na condição utilizada).

Os sinais PWM que controlam a rotação dos motores vêm do microcontrolador responsável pela inteligência periférica, que será descrito mais adiante.

Os motores citados não têm nenhum sensor que meça sua rotação. Assim, foi necessário criar *encoders* para medir a distância percorrida ou o ângulo da direção. Para isso foram utilizados sensores infra-vermelho do tipo QRB1114, de curta distância (poucos milímetros). Estes emitem um sinal infra-vermelho e medem a intensidade do sinal que retorna. Para esta aplicação, utiliza-se o sensor a uma distância fixa de uma roda com cores alternadas entre claro e escuro (preto e branco), como o da Figura 7. Se o sinal que retorna é forte, significa que o sensor está apontando para a parte clara (alta reflexão), e se for fraco, o sinal está sendo absorvido pelo objeto, como na faixa escura. Assim, contando-se as faixas cruzadas se pode ter o ângulo rotacionado, e portanto a distância percorrida.

Para o motor de tração utilizou-se 6 faixas por volta. Sabendo-se que o raio da roda é de 11cm, então tem-se uma precisão de aproximadamente 12cm. Para a direção, utilizou-se a resolução de 5 graus, resultando em 5 passos para a excursão de aproximadamente 25° . Para este último foi necessário cobrir a frente do veículo sob o suporte do motor, devido à incidência de luz solar que durante os testes se mostrou nociva ao funcionamento correto dos sensores.

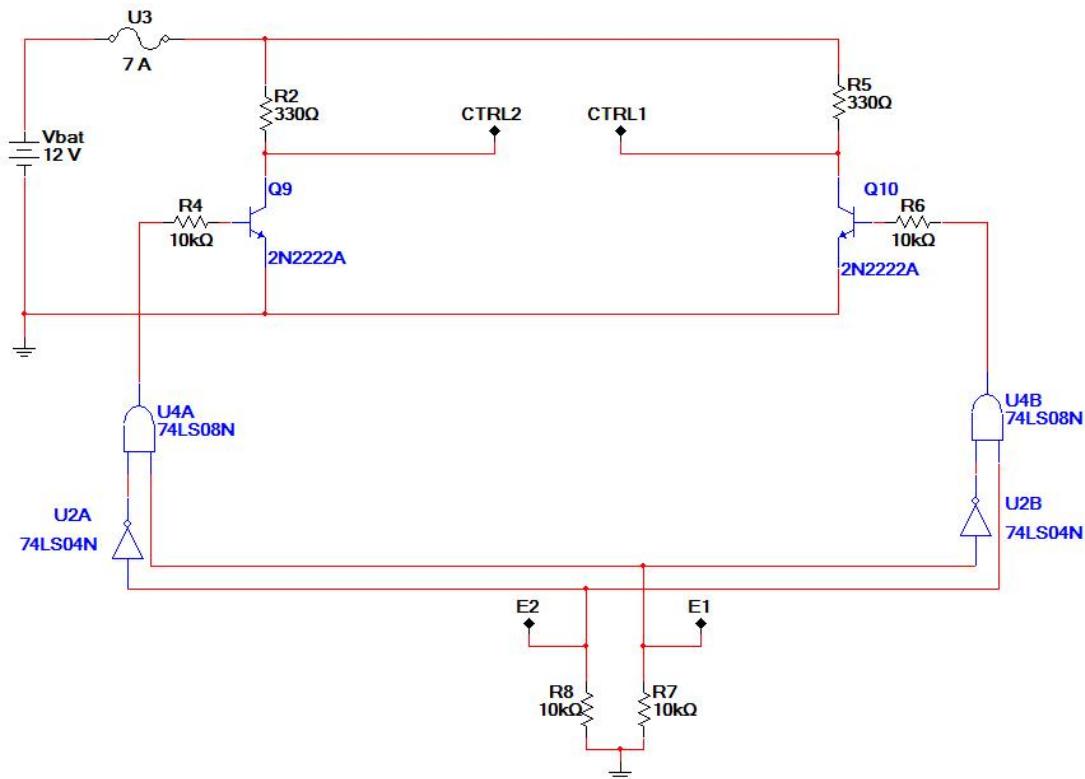
Além disso, foram instalados servomotores para orientar sensores. Optou-se por montar câmeras sobre estes, como visto na Figura 8, que são processadas pela inteligência central.

Para comandar os motores e processar as informações dos sensores foi utilizada uma

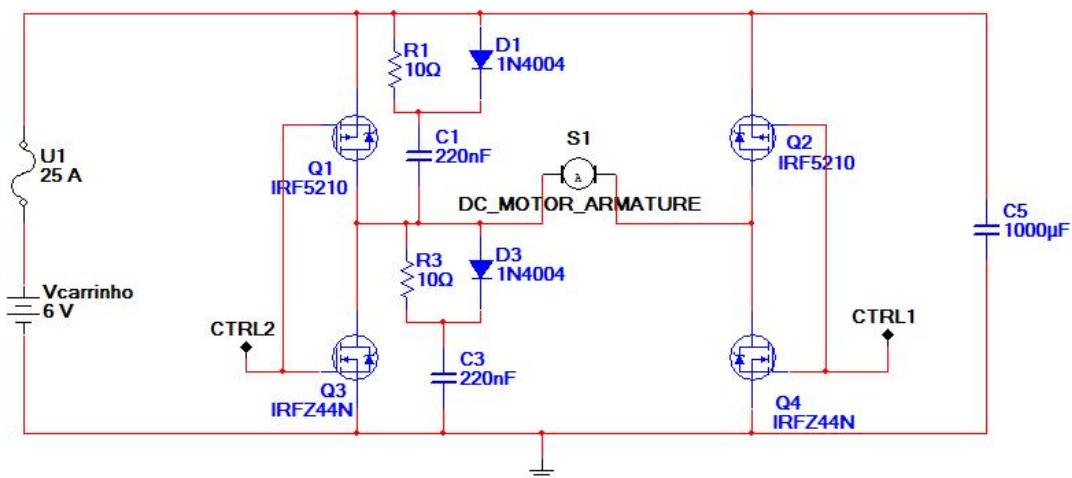
placa Arduino Mega 2560, que inclui o microcontrolador ATmega2560, da AtmelTM. Ele foi escolhido pela capacidade de comunicação USB já instalada, além da quantidade de portas A/D (análogo-digital) e PWM oferecidas.

A inteligência central embarcada no veículo despacha comandos do tipo [letra] [número] [\\n], no qual a letra indica a funcionalidade, o número é o argumento e a quebra de linha (\\n) indica o fim do comando. Comandos sem argumento são aceitos, como 'p' para parar o veículo. Entre os comandos disponíveis estão o controle de tração (velocidade para frente ou para trás), direção (orientar o volante em uma determinada direção, entre os 5 passos do *encoder*), movimentação (percorrer um espaço, em centímetros, para frente ou para trás, medido pelos *encoders*), controle dos servomotores e paralisação total do veículo.

Para as pontes de controle de motores foram utilizadas as saídas PWM do controlador, a 500Hz por padrão do Arduino. A informação dos sensores é lida diretamente pelas entradas A/D. O controle dos servomotores é feito utilizando rotinas prontas, oferecidas na interface de programação do Arduino.



(a) Eletrônica de controle



(b) Ponte H

Figura 5: Controle dos motores de tração

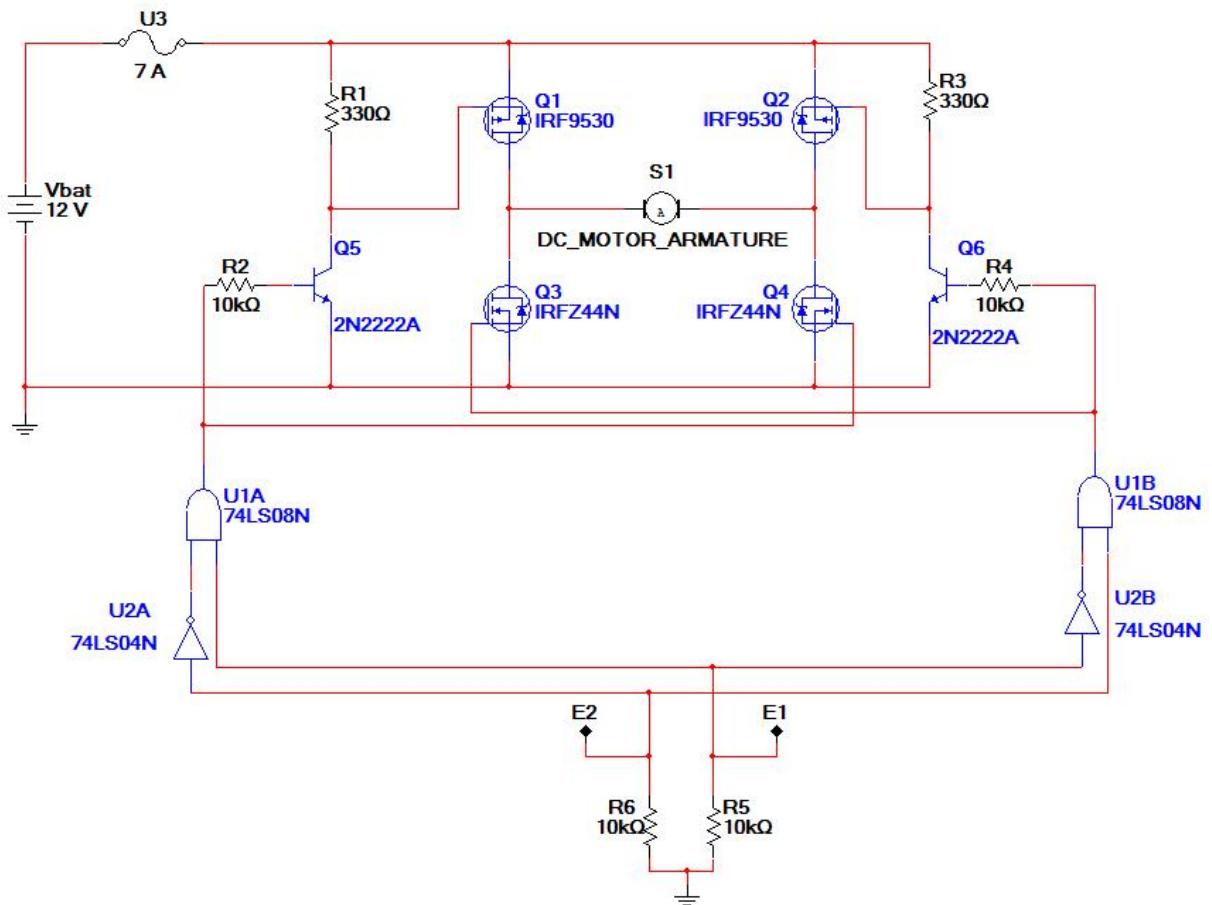


Figura 6: Ponte H para controlar a direção

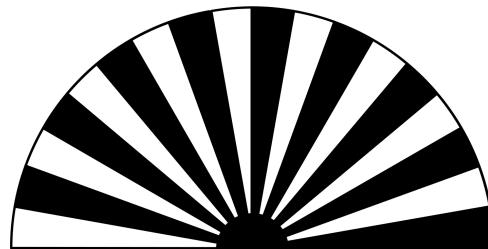


Figura 7: Disco de *encoder*



Figura 8: Servomotor para orientar a câmera

Resultados e discussão

Apenas os sensores internos ao veículo (*encoders*) foram efetivamente instalados. Embora os sensores externos (sonar e infra-vermelho) tenham sido estudados, estes não puderam ser posicionados e testados, e serão objeto de pesquisa futuros.

Percebeu-se que a configuração da ponte H utilizada para o motor de tração apresenta uma característica não-linear de torque no motor em relação ao sinal PWM na entrada. Isso ocorre porque ambas as chaves da ponte trabalham em PWM. Uma construção mais recomendada seria injetar a modulação em apenas uma das chaves, mantendo a outra fechada constantemente, até que se deseje parar ou trocar de direção.

Um sistema de parada de emergência por radiofrequência foi desenvolvido, utilizando o par transmissor-receptor TWS-DS-3 e RWS375-6. Verificou-se um alcance de 50m, suficiente para parar o veículo a uma distância segura no caso de descontrole. No entanto, não foi possível implementar os circuitos no veículo, por falta de uma estrutura mecânica robusta para sustentá-los no veículo. Esta parte também poderá ser realizada em trabalhos de continuidade.

Conclusões

Através das configurações descritas, foi possível criar um chassi robótico simples, atuando como corpo e membros de uma inteligência central. Os comandos recebidos desta são totalmente desvinculados da implementação física e dos circuitos utilizados, de modo que as soluções periférica e central puderam ser desenvolvidas de forma independente, comunicando-se apenas por uma interface comum.

As adaptações mecânicas, em conjunto com os circuitos elétricos, possibilitaram a substituição dos comandos manuais por comandos lógicos, recebidos via USB na placa do Arduino, que centraliza as funções da plataforma robótica. Os recursos do Arduino, como a quantidade de portas PWM e A/D e o poder de processamento, se mostraram suficientes para a proposta, abrindo ainda a possibilidade para expansões futuras em recursos ainda não alocados.

O motor que comanda o volante, através da mecânica desenvolvida, apresentou torque suficiente para substituir o comando mecânico, o que possibilitou o posicionamento da direção em passos 5°, determinados pelo *encoder* da direção. A bateria adicionada é capaz de suprir as necessidades do motor de direção e do restante da eletrônica embarcada, provendo uma autonomia de poucas horas de uso ao veículo.

Os sistemas de controle dos motores, utilizando a tecnologia MOSFET, são eficientes, dissipando pouca potência na forma de calor, além de não terem problemas de choques mecânicos, ao contrário da contrapartida utilizando relés.

O rádio de emergência foi projetado e testado, com alcance de 50m, suficiente para uma parada de emergência. No entanto, tanto o rádio quanto os sensores de distância não puderam ser finalizados, e poderão ser trabalhados em pesquisas futuras.

Referências Bibliográficas

- Lucca, N. de (2011). *Eletrônica de Potência*. Instituto Mauá de Tecnologia.
- Habbermann, D. (2010). *Detecção e Rastreamento de Obstáculos com uso de Sensor Laser de Varredura*. Tese de mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- Kornhauser, A. L.; Atreya, A.; Cattle, B.; Momen, S.; Collins, B.; Downey, A.; Franken, G.; Glass, J.; Glass, Z.; Herbach, J.; Saxe, A.; Ashwash, I.; Baldassano, C.; Hu, W.; Javed, U.; Mayer, J.; Benjamin, D.; Gorman, L., e Yu, D. (2007). *DARPA Urban Challenge Princeton University Technical Paper*. DARPA Urban Challenge 2007.
- Montemer, M.; Becker, J.; Bhat, S.; Dahlkamp, H.; Dolgov, D.; Ettinger, S.; Haehnel, D.; Hilden, T.; Hoffmann, G.; Huhnke, B.; Johnston, D.; Klumpp, S.; Langer, D.; Levandowski, A.; Levinson, J.; Marcil, J., e Orenstein, D. (2007). *Junior: The Stanford Entry in the Urban Challenge*. DARPA Urban Challange 2007.
- Reinholtz, C.; Alberi, T.; Anderson, D.; Bacha, A.; Bauman, C.; Cacciola, S.; Currier, P.; Dalton, A.; Farmer, J.; Faruque, R.; Fleming, M.; Frash, S.; Gothing, G.; Hurdus, J.; Kimmel, S.; Sharkey, C.; Taylor, A.; Terwelp, C.; Covern, D. V.; Webster, M., e Wicks, A. (2007). *DARPA Urban Challenge Technical Paper*. DARPA Urban Challange 2007.

Sedra, A. S. e Smith, K. C. (2008). *Microelectronic Circuits*. Oxford University Press.