

CONTROLADOR FUZZY APLICADO A UM VEÍCULO ELÉTRICO DE DUAS RODAS

Iuri M. Anjos, Cícero R. Souto, Simplício A. Arnaud, Alessandro J. V. Santos, Andreas Ries, Ana M. M. Lima, Alan G. P. Silva

UFPb-Universidade Federal da Paraíba - Paraíba, Brasil
Laboratório de Sistemas e Estruturas Ativas (LaSEA)
Laboratório de Instrumentação e Controle (LINC)
Cidade Universitária, S/N, Castelo Branco III, João Pessoa, PB, 58051-085

E-mails: iurimiranda@bol.com.br, cicrossouto@cear.ufpb.br, simplicioarnaud@gmail.com, alexsandro@cear.ufpb.br

Abstract - In the last decade, two-wheeled electric vehicles have been built for applications in human mobility, mobile robotic applications, industrial conveyors and robots for home applications. This work presents the design and development of a two-wheel electric vehicle controlled by a system based on a Fuzzy controller. A prototype was built with two DC motors coupled to the wheels of the vehicle, so the tires will be independently controlled but synchronized with the desired movement. The control system is feedback with the angular speeds of the motors, the driver's action on the vehicle's handlebar determines the reference speed and steering. The angular speeds of the motors and the angle of inclination of the handlebar are processed by a microcontroller. An electronic instrumentation system is applied to read the input variables and send the results to the output as a PWM signal to feed the motors. Sensors of rotary incremental encoder and MEMS gyro are used to measure the angular velocity and angle of inclination of the handlebar respectively. The power unit, too, was developed as an interface for the application of the PWM signal in the motors. A microcontrolled system was used for the purpose of managing the desired speed and direction of the vehicle. At the end, the driver's response to different pitch and yaw angles is presented, indicating by graphs the value of the angular velocities in RPM imposed by the controller. At the end, the control response is presented for different pitch and yaw angles, indicating by graphs the value of the angular velocities in RPM imposed by the controller.

Keywords: Electric vehicles, DC motor, fuzzy control, PWM.

Resumo - Nas últimas décadas, veículos elétricos de duas rodas foram construídos para aplicações de mobilidade humana, aplicações em robótica móvel, transportadoras industriais e robôs para aplicações domésticas. Sua versatilidade tem incentivado pesquisas no sentido de otimizar a instrumentação eletrônica e os sistemas de controles empregados para esse tipo de veículo. A robustez da instrumentação e do sistema de controle garantem maior segurança na sua movimentação. Neste sentido, este trabalho de pesquisa apresentada a concepção e o desenvolvimento de um veículo elétrico de duas rodas instrumentado com sensores giroscópio e encoder. Um sistema de controle baseado em lógica Fuzzy foi retroalimentado com as velocidades angulares dos motores informadas pelos encoders, e o direcionamento do veículo determinado pelo posicionamento do giroscópio acoplado ao guidão. Um protótipo em dimensões reais para um condutor foi construído com dois motores CC, controlados independentemente, para coleta de resultados experimentais. As velocidades angulares dos motores, e o ângulo de inclinação do guidão são processados por uma arquitetura eletrônica microcontrolada e que repassa as informações para um sistema de controle. Resultados da resposta de movimento do veículo controlado para diferentes ângulos de arfagem e guinada são apresentados.

Palavras Chaves – Veículos elétricos, motor CC, controle fuzzy, PWM.

I. INTRODUÇÃO

Veículos elétricos compactos de pequeno porte estão sendo solicitados para viagens de curta distância especialmente para áreas urbanas ou privados [1]. Dentre esse veículos se destacam os elétricos de único passageiro chamados de mobilidade pessoal. Esses estão tendo maior interesse popular e aumentando sua importância dentro da sociedade [2].

Usando o conceito de um sistema de pêndulo invertido, um veículo robotizado de duas rodas com sistema de controle embarcado foi implementado, e disponibilizado como o futuro

dispositivo de transporte pessoal chamado TransBOT. O TransBOT tem dois modos de condução; um modo de veículo regular, onde o contato estável com o chão é mantido por duas rodas e dois rodízios e, o modo de balanceamento, que mantém a postura do condutor estável com o veículo equilibrado em duas rodas. O veículo com mecanismo de balanceamento de duas rodas pode ser usado como veículo de transporte em áreas urbanas com vias estreitas, ou em vias com circulação de pedestres. A programação no ganho do controlador com base em controladores lineares é usada para diferentes modos de direção. Além disso, os ângulos de equilíbrio desejados são especificados para os diferentes

tamanhos e peso do condutor, a fim de ter um desempenho de controle e equilíbrio estável [1]. No mundo, existem várias soluções usadas em veículos auto equilibrados como Segway e o E.D.W.A.R. D. Um novo conceito de um veículo elétrico de duas rodas, auto equilibrado com assentos foi apresentado. Este veículo elétrico coloca a segurança em primeiro lugar. O veículo tem aparência incomum com formas regulares e estrutura compacta que permite que duas pessoas com alguma bagagem realizem pequenas viagens confortavelmente [3].

Em março de 2009, estudantes na escola de engenharia mecânica da Universidade de Adelaide, Austrália, iniciou o projeto e a construção de um veículo elétrico denominado de E.D.W.A.R.D. (Electric DiWheel com Active Rotação Damping). Na construção das rodas exteriores foi utilizado aço inoxidável com uma tira de borracha fixada na superfície exterior ou superfície rolante. Uma cadeira interna apoia o condutor que é mantido fixo no assento por um cinto de segurança. O quadro interno corre livre nas rodas externas devido a três rolos de nylon que são acoplados à armação interna por braços de suspensão. Dois motores CC que através de roda dentadas e uma corrente aciona uma pequena roda que age no raio interno da roda externa; assim, o veículo pode ser dirigido para frente e para trás. Quando são aplicadas tensões elétricas diferentes nos motores o veículo gira para direita ou esquerda. Na instrumentação do EDWARD foram utilizados giroscópio de estado sólido e encoders incrementais nas duas rodas motrizes [4].

A fim de cumprir os requisitos de veículo pequeno e leve, pesquisadores propuseram um veículo elétrico pessoal conduzido por uma única roda esférica, denominado de OmniRide. Um protótipo foi construído usando um sistema de controle com retroalimentação e estratégia de controle com estabilidade dinâmica. O veículo é sempre mantido na vertical em relação à superfície e permite a mobilidade imediata para todas as direções, ao contrário dos veículos pessoais do tipo duas rodas. No veículo OmniRide a roda esférica é acionada por quatro rodas omnidirecionais [5].

O Segway é um veículo elétrico dinâmico semelhante ao pêndulo invertido. Segway é um dispositivo que transporta uma pessoa a uma velocidade relativamente baixa limitada a aproximadamente 19 km/h. Combinada com um sistema de propulsão elétrica faz este veículo um forte candidato para fornecer transporte de curta distância nas ruas das cidades, calçadas e dentro de edifícios [6].

Baseado nos trabalhos relacionados com veículos elétricos de pequeno tamanho esta pesquisa desenvolveu um veículo tipo Segway instrumentado com giroscópio e encoders controlado por um sistema de controle fuzzy. Sua contribuição é apresentar resultados do controle fuzzy, baseado nas informações dos sensores, para controlar a velocidade e direção.

II. SIMULAÇÃO NO TOOLBOX SIMULINK DO CONTROLADOR FUZZY APLICADO AO VEÍCULO ELÉTRICO

A partir da função de transferência F_{cn} , obtida do conjunto acionamento PWM e motor, realizou-se a simulação no Simulink do controlador Fuzzy aplicado ao veículo. Na Figura (1) mostra-se a programação no Simulink do controlador Fuzzy, conforme pode-se constatar, neste controlador tem-se duas entradas, do tipo degrau para variar a velocidade angular das rodas e do ângulo de guinada, sendo as duas plantas a serem controladas, denominadas de F_{cn} e F_{cn1} . F_{cn} e F_{cn1} são iguais pois representam a função de transferência do mesmo motor, ou seja os motores são idênticos e fixado cada um a uma roda.

As funções de pertinência e as base de regras que foram utilizadas no bloco Fuzzy do sistema de controle podem ser vistas na Figura (2) e Tabela (1) respectivamente. O controlador fuzzy possui uma base de regra bidimensional, tendo como variável de entrada o erro e a derivada do erro, e como variável de saída o sinal de controle.

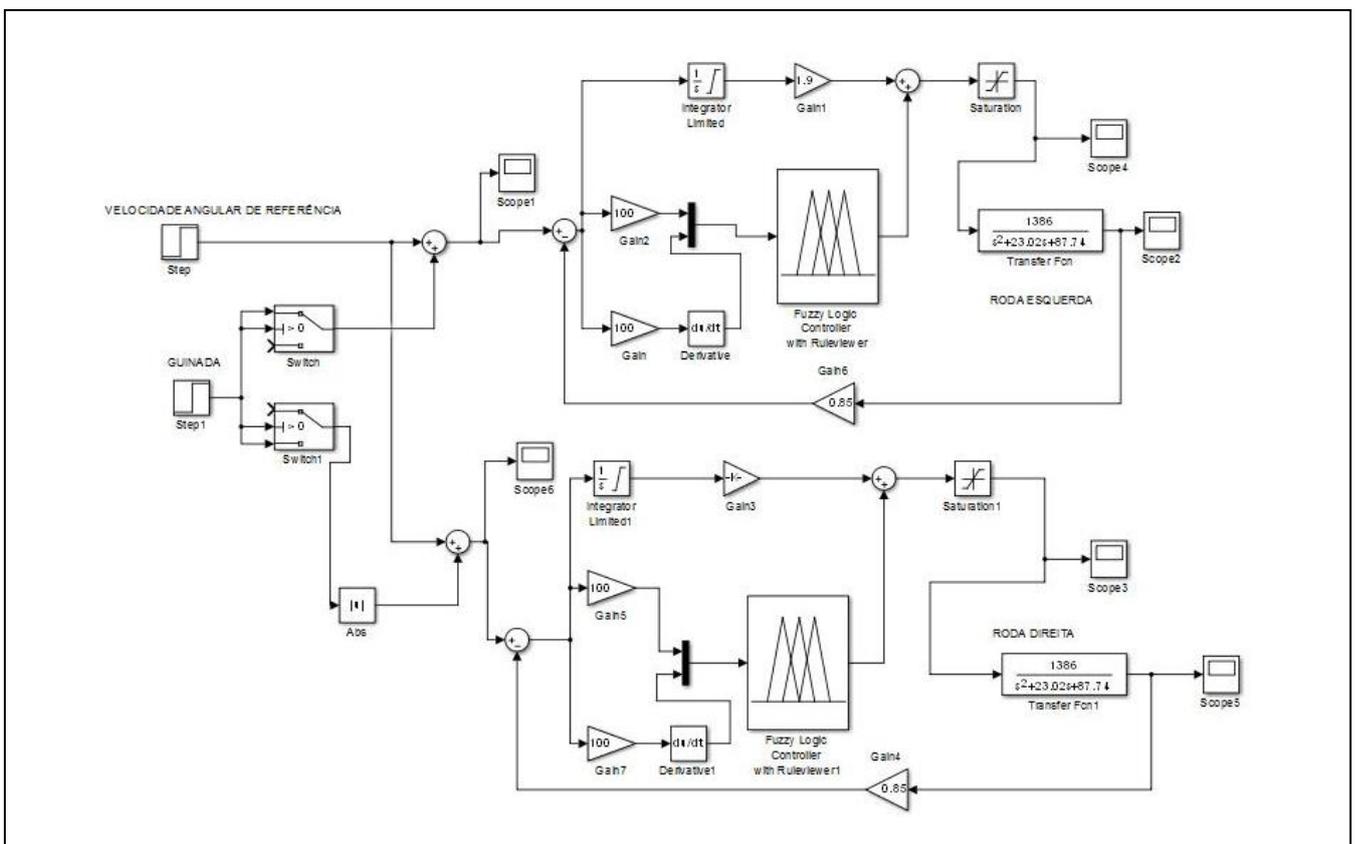


Figura 1. Controlador Fuzzy aplicado ao veículo elétrico

No controlador fuzzy as funções de pertinência são do tipo triangular e trapezoidal, a inferência utilizada foi do tipo Mandani e a defuzzificação do tipo centróide. As funções de pertinência são as mesmas para o “erro”, para a “derivada do erro” e para saída.

Foram escolhidos 05 conjuntos fuzzy, sendo:

- PM = Positivo médio;
- PP = Positivo pequeno;
- ZR = Zero;
- NP = Negativo pequeno;
- NM = Negativo médio.

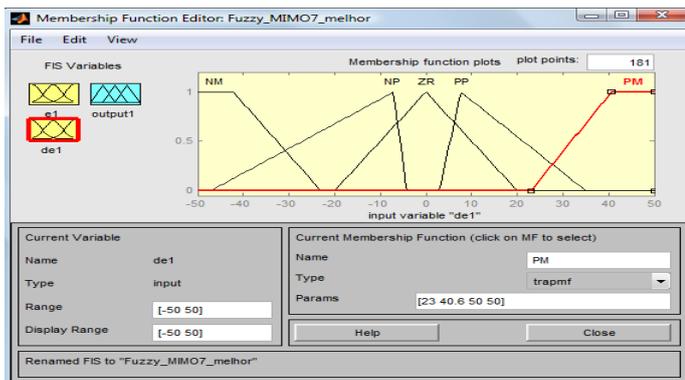


Figura 2. Função de pertinência da derivada do erro de1

Tabela 1 - Tabela da base de regras

		dE				
E	NM	NM	NM	NM	NP	ZR
	NM	NM	NM	NP	ZR	PP
	NM	NP	NP	ZR	PP	PM
	NP	ZR	ZR	PP	PP	PM
	ZR	PP	PP	PM	PM	PM

Na simulação do controlador Fuzzy no bloco Step foi aplicado um degrau de amplitude 30 rpm no instante $t=0$, que corresponde a velocidade angular de referência, já no bloco Step1 foi aplicado um degrau no instante $t=0$ de amplitude 5 rpm, que corresponde ao ângulo de guinada convertido para rpm. A partir do sinal do ângulo de guinada, o valor da velocidade angular de 5 rpm irá somar ou não ao sinal Step; se o ângulo de guinada for positivo, o bloco Switch irá colocar 5 rpm na entrada do somador 1; esse valor será somado com a velocidade de referência e aplicado ao controlador da roda da esquerda, simulando assim um deslocamento para direita. Se por outro lado, o ângulo de

guinada for negativo, o bloco Switch1 irá colocar 5 rpm na entrada do somador 2; esse valor será somado à velocidade de referência e aplicado ao controlador da roda direita, simulando assim um deslocamento para esquerda.

Nas Figuras (3) e (4) têm-se o resultado da simulação conforme sinais medidos no Scope2 e Scope5 respectivamente. Na Figura (5), referente ao sinal do Scope4, apresenta-se a variável de controle aplicada à planta.

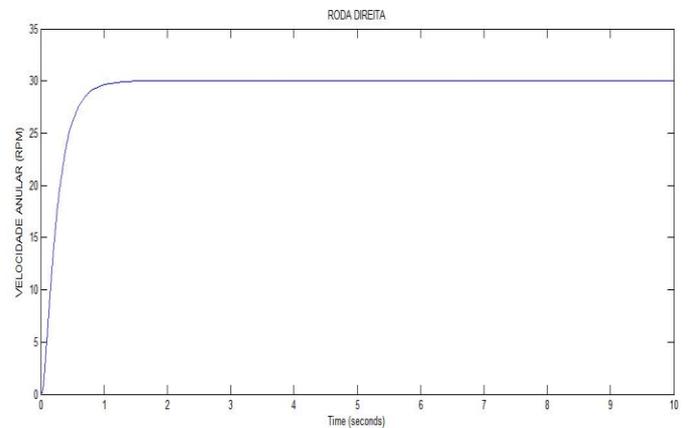


Figura 3. Velocidade angular medida na roda esquerda devido ao degrau Step e ao ângulo de guinada aplicado ao controlador Fuzzy.

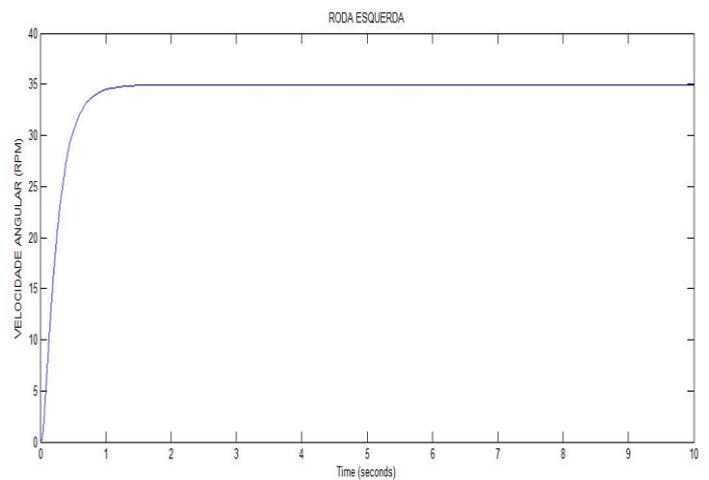


Figura 4. Velocidade angular medida na roda direita devido ao degrau Step e ao ângulo de guinada aplicado ao controlador Fuzzy.

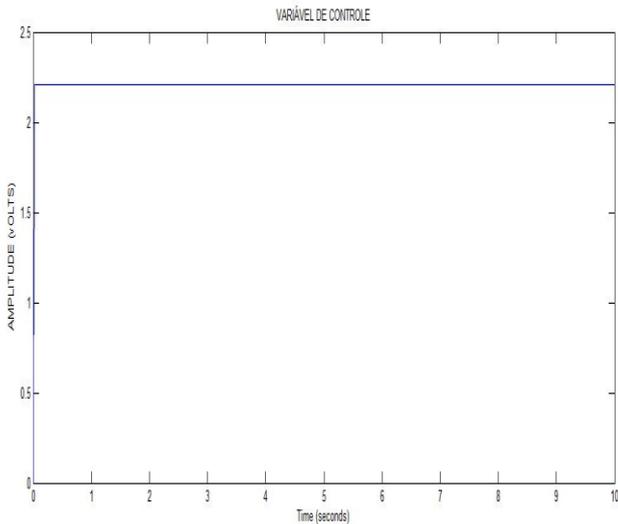


Figura 5. Variável de controle aplicado função de transferência referente a roda da esquerda.

III. MATERIAIS E MÉTODOS

Para o desenvolvimento desta pesquisa foi desenvolvido um protótipo do veículo elétrico em tamanho real. O veículo foi construído com dois motores elétricos de corrente contínua (motor CC), cada um instrumentado com um encoder. O encoder óptico incremental faz a medição da velocidade angular do veículo em movimento. Para isso foi desenvolvido um condicionador de sinais microcontrolado para o encoder que entrega o valor da velocidade instantânea para o sistema de controle. Um giroscópio posicionado no guidão indica qual o movimento que o veículo deveria executar: para frente, para trás, girar para direita ou para esquerda. Quando o veículo é inclinado para frente o ângulo do giroscópio determina a velocidade de avanço. O mesmo ocorre com a inclinação do guidão para trás. Com a inclinação do guidão para a direita ou para esquerda o ângulo do giroscópio indica que o veículo irá girar para direita ou esquerda. O giro do veículo é determinado pela diminuição da corrente em um motor e elevar ou manter a corrente elétrica no outro. Essa variação de velocidade angular dos motores foi conseguida pela mudança do duty cycle do sinal PWM que alimentava os motores. Na Figura (6) é apresentado um modelo esquemático e o protótipo do veículo elétrico tipo Segway com a indicação resumida dos componentes mais importantes do veículo.

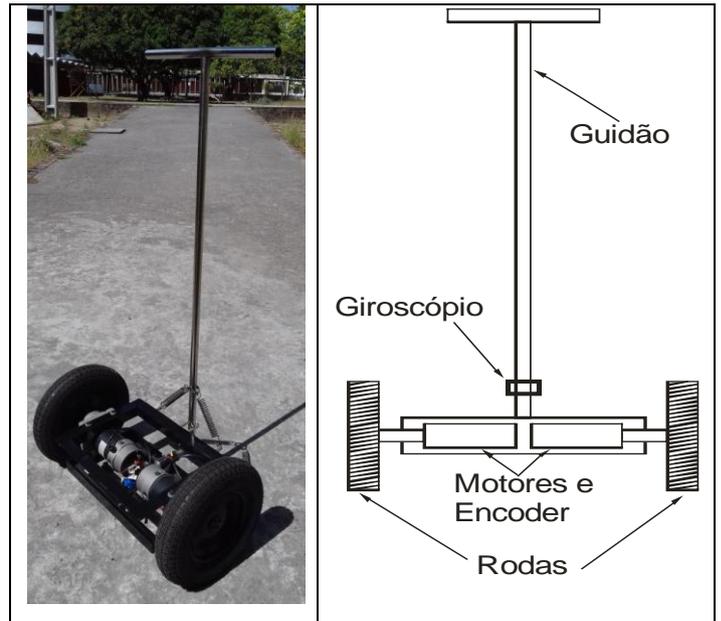


Figura 6. Protótipo e diagrama esquemático do veículo elétrico.

Nesse trabalho foi utilizado um encoder óptico incremental rotativo fixado no eixo de cada motor. O encoder produziu um sinal digital que é comparado com uma referência e em seguida provoca o disparo de um circuito multivibrador monoestável. A saída digital do monoestável é conectada ao Arduino Uno para processar o sinal de onda quadrada e determinar as velocidades em rpm dos motores. Um circuito multivibrador monoestável foi necessário para dar maior estabilidade ao sinal do encoder. Nas Figuras (7) e (8) estão apresentados os circuitos elétricos que foram utilizados para condicionamento do sinal do encoder.

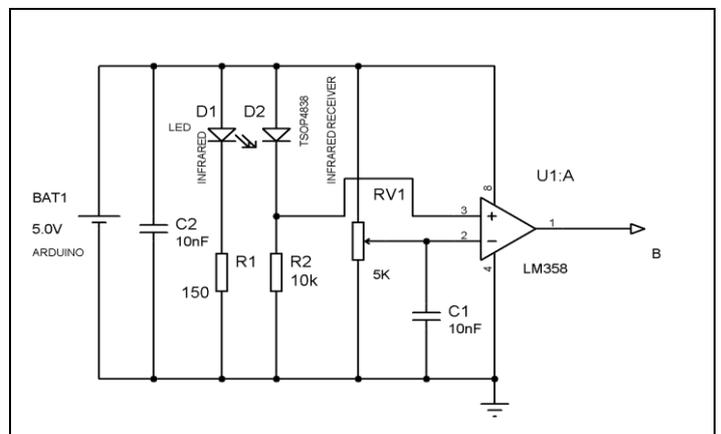


Figura 7. Condicionador de sinais do encoder.

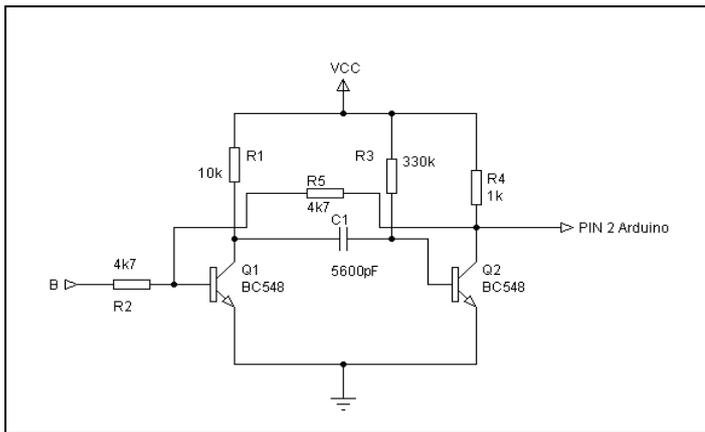


Figura 8. Multivibrador monoestável.

Foi utilizando neste trabalho a placa GY521 baseado no CI MPU-6050 de fabricação InvenSense que possui no mesmo encapsulamento um acelerômetro e giroscópio com tecnologia MEMS. No total são 6 eixos, sendo três para o acelerômetro e 3 para o giroscópio. O MPU-6050 possui internamente um recurso chamado DMP (Digital Motion Processor) que permite que o algoritmo de detecção de movimento seja processado no próprio CI liberando o microcontrolador dessa tarefa.

O DMP faz a aquisição do acelerômetro, giroscópio e sensor adicional e ainda o processamento dos dados. O resultado pode ser lido diretamente ou colocado em um buffer do tipo FIFO. Por ele ser compatível com sistemas microcontrolados foi conectado diretamente ao Arduino Uno que se encarregou de processar e enviar o resultado para o sistema de controle.

Para coleta de dados dos sensores processadas pelo Arduino, para o sistema de controle e coleta dos resultados experimentais foi utilizada uma placa de aquisição da National Instruments e um computador tipo notebook. A opção de utilizar a placa da National Instruments foi devido a facilidade de implementação da rotina de controle no software LabView.

Para acionamento dos motores foi desenvolvido um circuito de potência na configuração de ponte H com transistores MOSFET IRFP264N. Este circuito possibilitou, também, a inversão de sentido de rotação dos motores para que o veículo se movimentasse para frente e para trás. Na Figura (9) está apresentado o circuito de potência para a alimentação dos motores de corrente contínua do veículo elétrico.

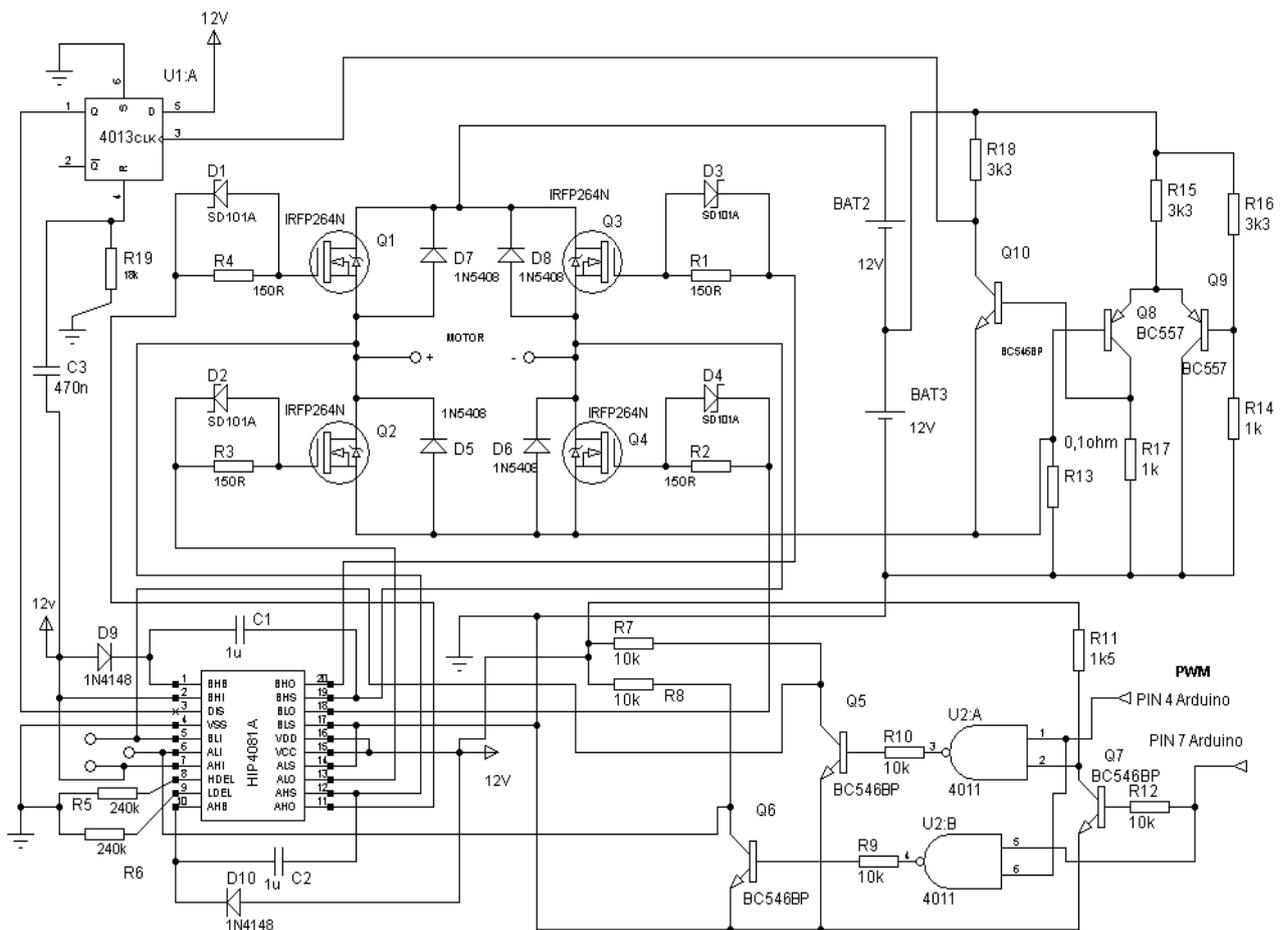


Figura 9. Circuito de potência para a alimentação dos motores

O sistema de controle foi desenvolvido utilizando a interface de hardware DAQ com o programa em Labview. O sistema de controle recebe os dados dos sensores processados pelo Arduino e devolve a resposta do controlador para o Arduino atuar sobre o circuito de potência dos motores. A variável de controle atua diretamente sobre a variação do duty cycle do sinal PWM que é aplicado aos motores.

O diagrama em blocos simplificado do sistema de controle é mostrado na Figura (10). As leituras do ângulo do giroscópio e dos sinais dos encoders são realizados pelo Arduino, que faz o processamento informando ao controlador quais os ângulos e velocidade dos motores. O controlador Fuzzy processa a informação e envia a variável de controle para o Arduino comandar os motores, a partir da ponte H, provocando a movimentação do veículo para frente, para trás, para esquerda ou para a direita.

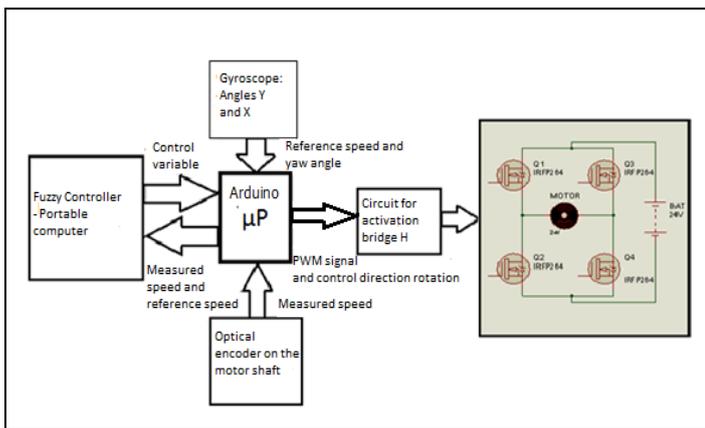


Figura 10. Diagrama em blocos simplificado do sistema de controle.

IV. RESULTADOS E DISCURSÕES

Para este protótipo, até o estado atual, foram verificadas a resposta do sistema de controle baseado nos sensores para alguns ângulos de inclinação (arfagem) e de direção (guinada).

A. Resultado experimental com a variação do ângulo de arfagem

Para esse experimento foram aplicados três ângulos de arfagem de 30°, 40° e 50°. Esses ângulos apresentaram velocidades diferentes do veículo para frente ou para trás. Nesse caso, o veículo foi inclinado baseado na leitura do giroscópio e fixado quando chegou na posição desejada. A relação de ângulo por velocidade obedeceu uma regra direta de que para uma elevação de 1 grau no ângulo uma rotação por minuto era incrementada nos motores. Foi utilizada uma regra simples inicialmente para se ter idéia da dinâmica do veículo instrumentado e controlado. Na Figura (11) é mostrado que para o ângulo de arfagem de 30°, o veículo atingiu o regime permanente de velocidade de 30 rpm em um tempo de aproximadamente 40 s. Esse tempo foi menor do que nos ângulos de arfagem 40° e 50° que tiveram tempos de

estabilização de aproximadamente 50 s e 75 rpm, respectivamente. Esses resultados foram obtidos para uma das rodas do veículo elétrico apenas com o ângulo de arfagem sendo modificado. Entretanto, na prática, os ângulos de arfagem e guinada estão sempre ocorrendo.

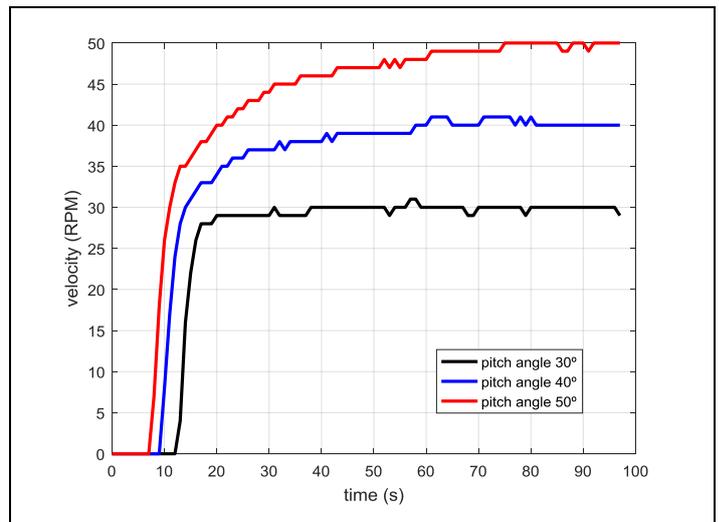


Figura 11. Resposta dinâmica do veículo para três ângulos de arfagem.

Na Figura (12) é mostrado a curva de resposta do ângulo de arfagem para uma referência de 29° com o ângulo de guinada igual a 0°. Associada a essa resposta, na Figura (13) é apresentado a resposta de velocidade dos dois motores baseado no ângulo de arfagem de 29°.

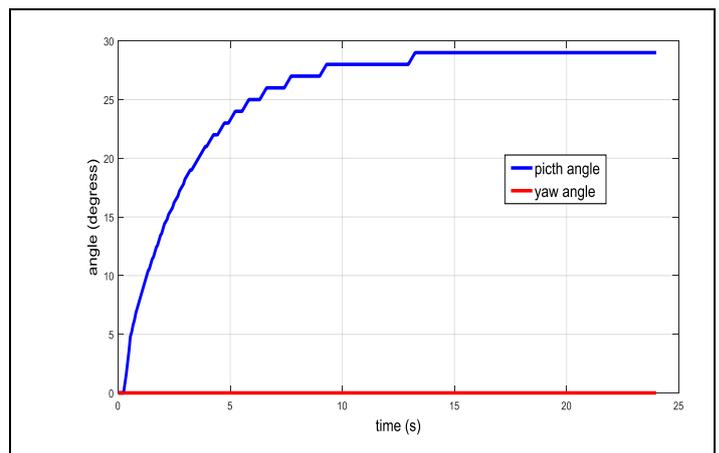


Figura 12. Resposta do giroscópio para ângulo de arfagem de 29° e ângulo de guinada de 0°.

Na Figura (13) os motores atingem as velocidades de regime permanente em aproximadamente 15 s, ou seja, acompanha o tempo do ângulo de arfagem da Figura (12).

Como não houve modificação do ângulo de guinada as velocidades dos motores se mantiveram iguais.

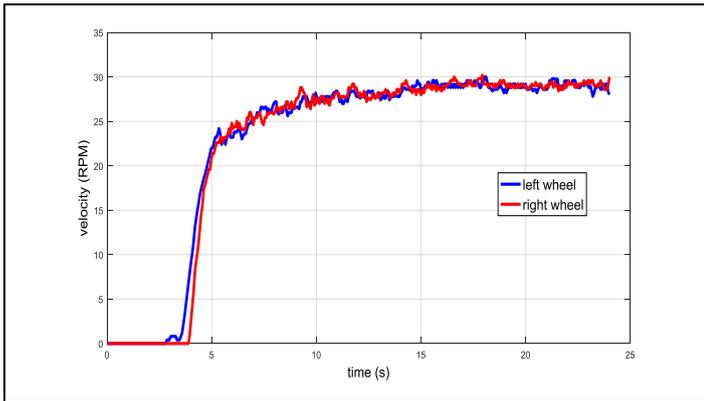


Figura 13. Velocidades dos motores para ângulo de arfagem de 29°.

O ângulo de guinada tem como objetivo indicar a direção e o sentido de deslocamento do veículo elétrico. Sua variação determina se o veículo irá se mover para direita ou para esquerda. Nesse caso, para o veículo de duas rodas, se mover para um lado ou para outro significa uma roda diminuir velocidade e a outra aumentar ou se manter na velocidade que está. Na Figura (14) está mostrado que o ângulo de arfagem foi de 27° e o ângulo de guinada pelo movimento lateral do guidão do veículo foi de -9° em regime permanente. Para esse caso, significa que o veículo deverá girar para a direita significando menor velocidade na roda direita e maior velocidade na roda esquerda. Na Figura (15) são apresentados os gráficos de velocidades para essa condição de ângulo de arfagem e guinada.

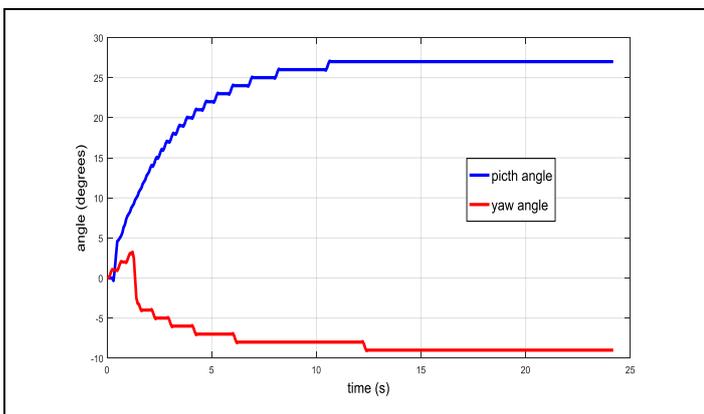


Figura 14. Variação de ângulo de arfagem 27° e guinada -9°.

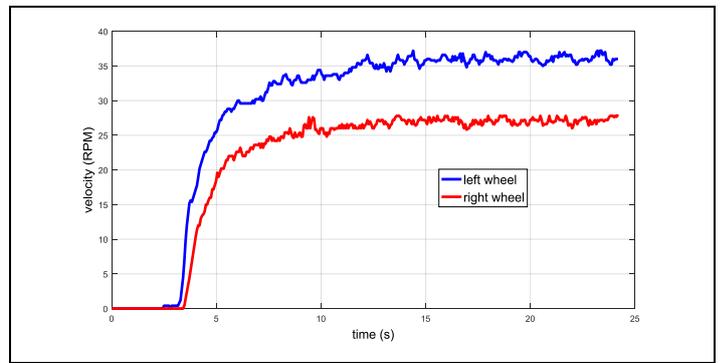


Figura 15. Velocidades dos motores para ângulos de arfagem 27° e guinada -9°.

Na Figura (16) está demonstrado que o ângulo de arfagem foi de 28° e o ângulo de guinada pelo movimento lateral do guidão do veículo foi de 8° em regime permanente. Para esse caso, significa que o veículo deverá girar para a esquerda significando menor velocidade na roda esquerda e maior velocidade na roda direita. Na Figura (17) são apresentados os gráficos de velocidades para essa condição de ângulo de arfagem e guinada.

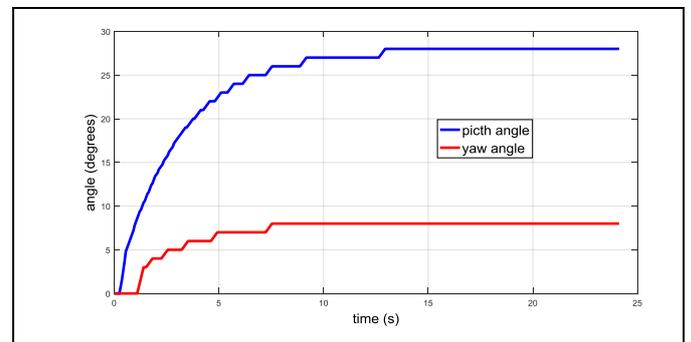


Figura 16. Variação de ângulo de arfagem 28° e guinada 8°.

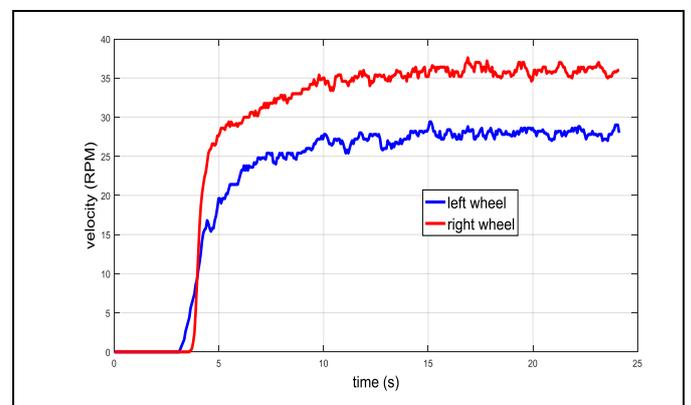


Figura 17. Velocidades dos motores para ângulos de arfagem 28° e guinada 8°.

V. CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou alguns resultados iniciais de uma pesquisa sobre veículos elétricos de pequeno porte utilizando sensor giroscópio e encoders. Os resultados demonstraram a capacidade de detecção de ângulo e de velocidade do veículo elétrico de duas rodas associados a um controlador fuzzy. Para as variadas referências de ângulos de arfagem e guinada foi possível perceber que o veículo elétrico respondeu como esperado, movimentando o veículo pra frente e para trás, para direita e para esquerda. Entretanto, como o trabalho ainda está em desenvolvimento, não foi possível apresentar o controle dinâmico do veículo para manter o guidão na posição vertical como um pêndulo invertido.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Laboratório de Sistemas e Estruturas Ativas (LaSEA) e ao Laboratório de

Instrumentação e Controle (LINC) da UFPB pelo apoio com a infraestrutura disponibilizada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] KIM, H. W; JUNG, S. Control of two-wheel robotics vehicle for personal transportation, *Robotica*, 2016, Vol.34 (5), pp.1186-1208.
- [2] KAMATA et al.2006.
- [3] D. Bzdziuch; W. Grzegózek. A Two-Wheeled, Self-Balancing Electric Vehicle Used As an Environmentally Friendly Individual Means of Transport, Lublin University of Technology, Poland, 2016.
- [4] DYER et al., 2009.
- [5] Tasuku Hoshino, Miki Yazawa, Ryota Naganuma and Kotaro Takada. Design and implementation of a personal mobility of single spherical drive. IOP Publishing, *Journal of Physics: Conference Series* 744 (2016) 012211.
- [6] ARNOLDO, Castro, 2012; "Modeling and dynamic analysis of a two-wheeled inverted-pendulum", Requirements for the Degree Master of Science in the George W. Woodruff School of Mechanical Engineering, Atlanta, EUA.