

VEÍCULO DE DUAS RODAS AUTOEQUILIBRADO

LEONARDO C. VIMIEIRO*, GILBERTO C. D. SOUSA†

**Depto. de Sistemas e Energia, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Unicamp
Av. Albert Einstein, 400, Cidade Universitária Zeferino Vaz, Distrito Barão Geraldo, 13083-852, Campinas,
SP, Brasil*
E-mail: leonardo.vimieiro@gmail.com

†*Depto. de Engenharia Elétrica, Universidade Vila Velha – UVV
Av. Comissário José Dantas de Melo, 21, Boa Vista, 29102-920, Vila Velha, ES, Brasil*
E-mail: gilberto.sousa@uvv.br

Abstract— This work analyzes the application of automatic control on the balance of a two-wheeled vehicle with parallel axes, similar to a motorcycle, through the stepping of the handlebar. The prototype, whose construction is also proposed in this study, has a microprocessed hardware and a control structure that consists of a compensator of PD type (proportional and derivative), implemented through an algorithm in C language. Through the bibliographic survey and the theoretical study it was possible to determine the dynamics of the proposed vehicle, as well as the variables involved in the process, in a simplified way, aiming to make the system feasible according to the objectives and deadlines. In this way, the goal of controlling a small scale prototype on the move was reached, keeping it vertically.

Keywords— Self Balancing, Self balancing Vehicle, Honda Rinding Assist, Systems Control, Autonomous Vehicles.

Resumo— Este trabalho analisa a aplicação de controle automático sobre o equilíbrio de um veículo de duas rodas com eixos paralelos, semelhante a uma motocicleta, por meio do esterçamento (Girar para um lado ou para outro) do guidão. O protótipo, cuja construção também é proposta deste estudo, tem um *hardware* microprocessado e uma proposta de controle que consiste em um compensador do tipo PD (proporcional e derivativo), implementada através de um algoritmo em linguagem C. Através do levantamento bibliográfico e do estudo teórico foi possível determinar a dinâmica do veículo proposto, bem como, as variáveis envolvidas no processo, de forma simplificada, visando tornar o sistema realizável de acordo com os objetivos e prazos. Desta forma, atingiu-se o objetivo de controlar um protótipo em miniatura em movimento, mantendo-o na vertical.

Palavras-chave— *Self Balancing*, Veículo Autoequilibrado, *Honda Rinding Assist*, Controle de Sistemas, Veículos Autônomos.

1 Introdução

A tecnologia nos meios de transporte tem enorme importância. Hoje, especialmente os estudos e pesquisas relacionados a sistemas de controle automático de direção dos carros, recebe grandes investimentos de diversas empresas e a disputa para sua implementação efetiva e comercialização é acirrada (Canaltech, 2017). No entanto, os veículos instáveis, como bicicletas, motocicletas e semelhantes, mesmo tendo também grande presença no dia a dia das pessoas, não são contemplados pelos grandes investimentos em pesquisa, principalmente, pelo fato de serem instáveis na posição vertical. Apesar disso, alguns protótipos de conceito foram desenvolvidos e, por exemplo, uma implementação de fato foi feita pela Honda, o Honda Riding Assist, porém ainda não comercializada (Honda, 2017).

Este estudo visa a aplicação de tecnologia nos veículos de duas rodas: motos, bicicletas e semelhantes. A ideia é aumentar a segurança e o conforto, podendo servir como base para implementação de sistemas de condução autônoma em outros estudos de desenvolvimento. O equilíbrio neste tipo de veículo é algo muito importante e seu controle pode trazer

muitos ganhos na segurança, por exemplo, impedindo que o condutor faça algum movimento que possa ser arriscado, evitando assim, que ele caia. Pode-se também, ter ganhos em acessibilidade, permitindo que pessoas com algumas deficiências físicas possam ter uma moto, por exemplo. Além disso, traz também ganhos no conforto, como não ser mais necessário o condutor se apoiar no chão quando está parado num semáforo, ou poder chamar sua moto ao sair de um shopping e ela o encontrar na porta. Tudo isso depende de um controle automático do equilíbrio.

Neste trabalho, os objetivos específicos foram:

- Construir um protótipo em escala reduzida de tamanho, no qual o sistema de controle deve ser implementado e testado;
- Estudar a estabilidade do veículo;
- Aplicar técnicas de controle que permitam o equilíbrio do protótipo na posição vertical enquanto em movimento.

2 Referencial Teórico

2.1 Honda Riding Assist

Recentemente, a Honda apresentou na CES 2017 — feira anual de tecnologia em eletrônicos — sua nova motocicleta, a Honda Moto Riding Assist. Essa moto possui um design comum, mas se mantém equilibrada na posição vertical mesmo parada e com seu condutor em cima, automaticamente. O seu sistema de controle do equilíbrio, Honda Riding Assist, faz uso essencialmente do esterçamento do guidão da moto e também altera a angulação do eixo do garfo em relação ao veículo. Não se sabe, evidentemente, por questões comerciais, se apenas o guidão é utilizado. No entanto, fica claro ao ver seu funcionamento, que o seu esterçamento é primordial na técnica de controle do equilíbrio utilizada. Ao obter o grau de inclinação lateral da moto o sistema calcula como deve esterçar o guidão para que o equilíbrio seja mantido (Honda, 2017).

Este método será explicado mais adiante pela semelhança ao que foi implementado neste projeto.

2.2 Equilíbrio e Centro de Massa

Como se deseja obter o equilíbrio de um corpo intrinsecamente instável neste projeto, deve-se ter em mente o que isso significa nas definições da física.

Quando um corpo está em movimento retilíneo uniforme, mas o somatório das forças que atuam sobre ele é nulo, ele se encontra em equilíbrio dinâmico. No caso de uma motocicleta, cuja altura é maior que sua largura e sua base de apoio é muito pequena, quando ela está se movimentando enquanto está na vertical, seu equilíbrio é dinâmico instável. Caso haja sobre ela uma força resultante lateral, ela pode tombar facilmente e entrar em um ponto de equilíbrio dinâmico estável. (Halliday, 2011). Para o caso da motocicleta, se considerará apenas o equilíbrio dinâmico do tipo instável — admitindo-se que ela somente se movimenta quando está na vertical. Neste caso, ela se mantém na vertical, mas estando em um movimento reto, sem força resultante sobre o corpo. Será admitido que a força do motor de acionamento é equilibrada pelas forças de atrito, assegurando um movimento retilíneo uniforme com velocidade constante v para frente, como demonstra a Figura 1.

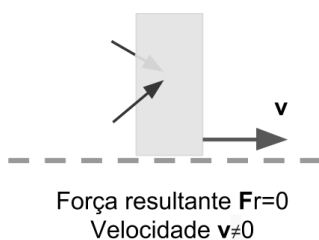


Figura 1. Objeto em equilíbrio dinâmico instável com somatório de forças atuantes igual a zero.

Levando-se em conta que todas as partículas de um corpo sofrem a ação da gravidade, para tornar sua análise possível, admite-se a soma vetorial dessas forças obtendo um único ponto equivalente de ação, o centro de gravidade. Tomando-se a mesma aceleração para todas as partículas, o centro de gravidade coincide com o centro de massa. Admitindo-se também que o corpo tem massa uniformemente distribuída, seu centro de gravidade coincide também com seu centro geométrico. Supondo-se o corpo retangular das imagens na Figura 2, tem-se que ele se manterá na vertical até que o centro de gravidade coincida verticalmente com o ponto de apoio. A partir disso, a aceleração da gravidade gera um conjugado no corpo para o mesmo sentido que age a força que o empurrou e o faz virar para a horizontal (Halliday, 2011).

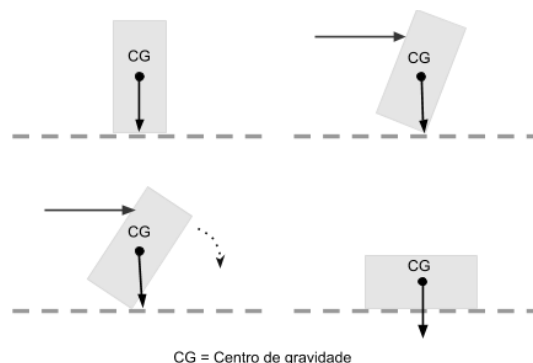


Figura 2. Força lateral inclinando um objeto e deslocando a resultante de ação da gravidade.

Sendo assim, para se atingir o equilíbrio, deve-se contrapor, à mesma medida, todas as forças que passam a agir sobre o protótipo. Por exemplo, caso o protótipo esteja na iminência de pender para o lado esquerdo, significa que há uma resultante agindo da direita para a esquerda, logo, deve-se impor uma força de sentido contrário e de mesma intensidade, de modo que o somatório das forças seja nulo.

Sendo assim, as condições para que haja equilíbrio de um corpo são (Halliday, 2011):

1. A soma vetorial de todas as forças externas que agem sobre o corpo deve ser nula;
2. A soma vetorial de todos os torques externos que agem sobre o corpo, medidos em qualquer ponto, deve ser nula.

2.3 Modelagem Matemática

Em virtude de uma motocicleta e do protótipo proposto neste trabalho serem semelhantes a uma bicicleta, por simplificação, a modelagem matemática será aproximada para o modelo físico de uma bicicleta.

2.3.1 Definições do Modelo

O modelo utilizado nos cálculos, suas medidas e parâmetros estão definidos como nas Figuras 3, 4 e 5:

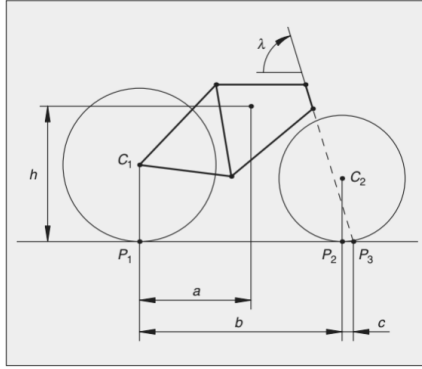


Figura 3. Vista lateral esquemática da bicicleta (Astrom; Klein; Lennartsson, 2005).

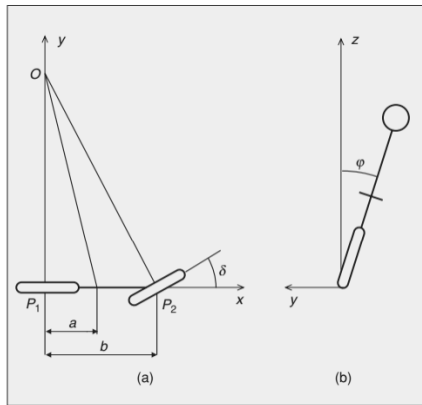


Figura 4. Vista superior (a) e vista traseira (b) (Astrom; Klein; Lennartsson, 2005).

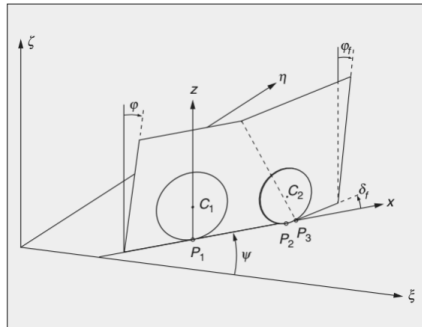


Figura 5. Superposição dos planos tridimensionais (Astrom; Klein; Lennartsson, 2005).

Onde:

- “h” é a altura do centro de massa;
- P1 e P2 são os pontos de contato das rodas traseira e dianteira com o chão, respectivamente;
- P3 é o ponto de contato com o chão da projeção colinear do garfo dianteiro;
- “a” é a distância do ponto de contato da roda traseira P1 e a linha vertical do centro de massa;
- “b” é a distância entre P1 e P2;
- “c” é a distância entre P2 e P3;
- λ é o ângulo de inclinação do garfo dianteiro;

- δ é o ângulo de esterçamento do guidão;
- δ_f é o ângulo efetivo de esterçamento do guidão em relação ao plano XY;
- φ é o ângulo de inclinação lateral da bicicleta;
- φ_f é o ângulo efetivo de inclinação da bicicleta devido ao esterçamento do guidão.

2.3.2 Equacionamento

Sistemas como uma bicicleta possuem vários graus de liberdade, podendo o sistema chegar à quarta ordem. No entanto, visando simplificar a análise, e obter um sistema de equações mais simples de se trabalhar e implementar, serão tomadas algumas aproximações e situações hipotéticas. Será considerado que a bicicleta possui 4 partes rígidas, duas rodas, um quadro e um garfo. As rodas estão sempre em contato com o chão e não deslizam lateralmente. Além disso, o condutor não será considerado na análise (Astrom; Klein; Lennartsson, 2005).

Toda a modelagem descrita a seguir foi essencialmente baseada no artigo de Tanaka e Murakami (2004), sofrendo apenas pequenas adaptações ao sistema e adequações de parâmetros referentes às Figuras 3, 4 e 5.

Segundo Tanaka e Murakami (2004), ao fazer uma curva, a bicicleta sofre a ação da força centrífuga, que impõe a tendência de sair da curva. A equação da força centrífuga é mostrada na equação 1:

$$F_c = \frac{m v^2}{R}, \quad (1)$$

na qual, m é a massa do objeto, v é a velocidade do objeto e R é o raio da trajetória circular no momento capturado – na Figura 4, R é a distância P_2O .

Admitindo-se que as rodas não deslizam lateralmente, pode-se calcular $R = P_2O$ como:

$$P_2O = b \cot \delta_f. \quad (2)$$

O ângulo de inclinação lateral é φ . Quando φ é maior que 0° a trajetória circular da curva da bicicleta deixa de ser um círculo perfeito e passa a ser um elipse. Neste caso, seu raio pode ser calculado como:

$$P_2O = b \cos \varphi \cot \delta_f. \quad (3)$$

Assumindo que δ é suficientemente pequeno – isto é, admitindo-se que a variação necessária do ângulo δ para se manter o equilíbrio da bicicleta durante o movimento deve ser pequena –, e como a tangente de um ângulo pequeno é aproximadamente o próprio ângulo, tem-se:

$$P_2O = \frac{b}{\delta_f} \cos \varphi. \quad (4)$$

Em virtude do eixo do garfo não coincidir com o eixo da roda dianteira na base de apoio em relação a vertical quando $\lambda < 90^\circ$, como demonstrado na Figura 3, existe uma variação no ângulo de direção e o ângulo de direção eficaz δ_f será calculado assim:

$$\delta_f = \delta \sin \lambda. \quad (5)$$

A partir das Equações 1, 4 e 5, a força centrífuga pode ser remodelada como:

$$F_c = \frac{m v^2}{b \cos \varphi} \delta \sin \lambda, \quad (6)$$

onde, m é a massa da bicicleta e v é a sua velocidade linear.

Uma bicicleta possui características de um pêndulo invertido e a força gravitacional impõe a ela um torque, que a faz inclinar lateralmente até tombar e seu equilíbrio ser do tipo estável. O torque gravitacional num pêndulo invertido pode ser calculado da seguinte forma:

$$T_g = -mgh \sin \varphi. \quad (7)$$

Um condutor em uma bicicleta ou motocicleta pode alterar a dinâmica do modelo de acordo com seus movimentos. Como o modelo aqui proposto não terá, inicialmente, condutor, isso não precisa ser considerado na modelagem matemática. Sendo assim, de acordo com a 2ª Lei de Newton, pela qual o torque líquido é igual ao momento de inércia multiplicado pela aceleração angular do corpo, a equação dinâmica da bicicleta será a seguinte:

$$J \frac{d^2 \varphi}{dt^2} = T_g + F_c h = -mgh \sin \varphi + \frac{m v^2 h}{b} \sin \lambda \cdot \delta. \quad (8)$$

2.4 Definições do Controlador

Assumindo que o ângulo de inclinação deve ser pequeno e será mantido assim, tem-se que $\sin \varphi \approx \varphi$ e $\cos \varphi \approx 1$. Assim, usando espaço de estados, a equação dinâmica se torna:

$$\frac{d}{dx} \begin{bmatrix} \varphi \\ \dot{\varphi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{mgh}{J} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varphi \\ \dot{\varphi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{mhv}{bj} \sin \eta \end{bmatrix} \delta. \quad (9)$$

Sabe-se que o ângulo de inclinação φ está relacionado com o ângulo de esterçamento δ . Definindo-se o ângulo de inclinação desejado como φ_d e sendo,

$\delta = K_1(\varphi_d - \varphi) - K_2 d\varphi/dt$, onde K_1 e K_2 são ganhos do sistema, a função de transferência de φ_d para φ fica assim representada:

$$\frac{\varphi}{\varphi_d} = \frac{BK_1}{s^2 + (BK_1 - A)s + BK_2}, \quad (10)$$

$$\text{onde } A = -\frac{mgh}{J} \text{ e } B = \frac{mhv^2}{bj} \sin \lambda.$$

Como a forma canônica de um sistema de segunda ordem é representada como a equação 11,

$$G(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2}, \quad (11)$$

podemos então comparar as Equações 10 e 11, nas quais os ganhos K_1 e K_2 podem ser ajustados manualmente.

Tomando-se valores desejados para ξ e ω_n , é possível determinar os ganhos K_1 e K_2 . Como o parâmetro B é função da velocidade linear, os ganhos também mudam quando v muda. Por este motivo, os testes com o protótipo foram feitos com uma velocidade fixa estabelecida experimentalmente.

Sendo assim, o ângulo de esterçamento desejado, pode ser calculado como:

$$\delta_d = K_1(\varphi_d - \varphi) - K_2 \frac{d(\varphi_d - \varphi)}{dt}. \quad (12)$$

2.4.1 Dinâmica de Uma Bicicleta

A dinâmica de uma bicicleta é bastante interessante. Para se obter melhor estabilidade e controlabilidade, o garfo na roda dianteira é inclinado. Isto serve para que a bicicleta, ao se inclinar, vire automaticamente a roda dianteira para o mesmo sentido. Caso a bicicleta esteja livremente em movimento e comece a pender para um lado, seu guidão irá girar para o mesmo sentido, então, ela percorrerá uma trajetória circular e sofrerá ação da força centrífuga, ao sofrer esta ação, ela tende a se inclinar para o sentido contrário, retomando o equilíbrio na vertical (Astrom; Klein; Lennartsson, 2005). O método para controlar o protótipo neste trabalho fez uso desta ideia, ou seja, ao obter um sinal de erro pela inclinação, o controlador aciona o servo motor do garfo de modo a virá-lo para o mesmo sentido, gerando, portanto, o mesmo efeito comentado.

As Equações 8 e 9 mostram que o sistema, da forma como foi modelado, tem sua ação de controle igual a 0 quando a velocidade é igual 0, ou seja, o sistema não é controlável quando parado. Na verdade, é típico de sistemas assim, ter uma velocidade mínima em que se torna controlável, e não simplesmente que a velocidade seja diferente de 0.

2.4.2 Controlador Proposto

Ao analisar o sistema através da fundamentação discutida nas seções anteriores, levando-se também em consideração conceitos discutidos em Sharp (1971) e Ogata (2010) e, sabendo-se que é intrinsecamente instável, o compensador ideal, pela simplicidade e eficiência, é do tipo PD (Proporcional Derivativo). O compensador proporcional tem a característica de alocar o ponto de ação do sistema, dentro do seu lugar das raízes já existente, ao se variar o ganho direto, normalmente, aumentando ou dimi-

nuindo sua velocidade e reduzindo o erro em regime permanente. Já o compensador derivativo tem a característica de suavizar a ação do sistema, prevendo o seu comportamento, e assim, tende a diminuir sua oscilação e o sobressinal. Sendo assim, sabendo-se que a ação do sistema deve ser rápida e que o sistema pode gerar oscilações rapidamente, um controlador do tipo PD foi utilizado na aplicação. (Ogata, 2010).

Na Figura 6 é possível ver o diagrama de blocos do controlador proposto e na Figura 7 a lógica do controlador que foi aplicada.

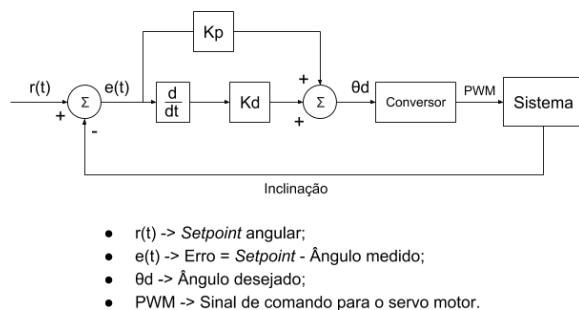


Figura 6. Diagrama de Blocos do Controlador

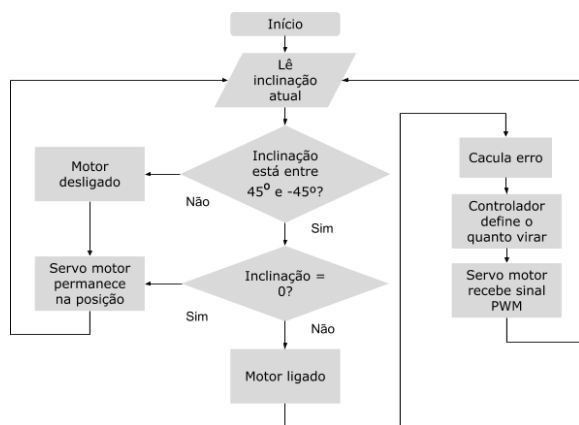


Figura 7. Fluxograma da Lógica do Controlador

3 Projeto do Protótipo

Os materiais utilizados na implementação do protótipo foram previstos para serem, na medida do possível, simples, com baixo custo e compactos devido à escala reduzida do protótipo e estão listados na Tabela 1.

Tabela 1. Componentes do Protótipo.

COMPONENTES	FUNÇÕES
Motor com caixa de redução	Propulsão do veículo na roda traseira
Servo motor com caixa de redução	Esterçamento da roda dianteira
Arduino Pro Mini com microcontrolador AVR ATMEGA 328p de 16 MHz	Controle geral do sistema
Sensor com giroscópio	Determinação da posi-

mais acelerômetro MPU6050	ção do veículo
Driver de motor ponte H TB6612FNG	Acionamento do motor e separação entre os circuitos de acionamento e controle
Placa de comunicação via bluetooth HC-05	Controle remoto do veículo
Baterias de lítio	Alimentação de todo o sistema
Reguladores de tensão LM7805 e LM317	Fornecimento das tensões de 5V e 7.2V
Chapa de alumínio	Construção do chassi
Diversos	Parafusos, espaçadores, fios, entre outras coisas que foram necessários na montagem e construção do modelo

3.1 Arduino

É, na verdade, uma placa de prototipagem que contém o microcontrolador ATMEGA 328p de 8 bits, possui 23 pinos de I/O e trabalha com a maior parte das instruções sendo executadas em 1 ciclo de clock. Essa placa foi escolhida pela facilidade de ser adquirida, preço, facilidade de gravação e, principalmente, pelo tamanho.

3.2 MPU 6050

O sensor MPU 6050 com giroscópio e acelerômetro, está embutido na *Shield* GY521 e utiliza comunicação I²C. Ele possui 3 eixos de medição para o giroscópio e 3 eixos para o acelerômetro. É um equipamento de alta precisão, mas que pode ter muita sensibilidade e variação na saída. No entanto, esse problema pode ser contornado pelo uso de um filtro do tipo complementar, filtro de Kalman ou lendo os dados do seu DMP integrado (Processador Digital de Movimento), que fornece dados bastante estáveis e imunes a ruídos.

3.3 Alimentação Elétrica do Sistema

Todo o protótipo é alimentado por baterias do tipo Li-ion do modelo 16340 e baterias reutilizadas de aparelhos celulares. Elas são recarregáveis, pequenas e leves. A tensão de alimentação de 5V para os circuitos da placa Arduino, GY521 e HC-05 é obtida de um regulador de tensão LM7805. Como cada bateria pode fornecer uma tensão de até 4,2V, foram usadas duas baterias em série, fornecendo uma tensão final de até 8,4V. A tensão de alimentação do servo motor é obtida do LM317 regulado para cerca de 7,2V.

3.4 Ponte H TB6612FNG e Motor

O driver para o motor é do modelo TB6612FNG. Este componente é baseado em transis-

tores do tipo MOSFET o que leva as perdas por Efeito Joule a quase 0 e, consequentemente, reduz muito o tamanho da placa e o consumo, o que é desejável neste projeto tendo mais recursos e sendo mais vantajoso que a ponte H L298. Esta placa necessita de tensão de alimentação interna de 2,7V – 5,5V e tensão de alimentação para os motores de até 15V. Possui capacidade de corrente média de 1,2A e 3,2A de pico.

O motor é do tipo CC (Corrente contínua) com caixa de redução acoplada. Este motor possui tensão máxima nominal de operação de até 12V e velocidade de até 200 rpm.

3.5 Servo Motor

O servo motor é responsável por girar o garfo dianteiro, o qual é do modelo Micro Servo SG90. Possui tamanho reduzido, faixa de variação de posição de 0° a 180°, até 1,6 kgf.cm de torque e possui 2 fios para alimentação e 1 para controle através de PWM (*Pulse Width Modulation*). Trabalha com PWM na frequência de 50 Hz, sendo que se variando a aplicação de nível alto entre 0,5 ms e 2,5 ms, varia-se a posição do eixo entre 0° e 180°, proporcionalmente, sempre aplicando nível baixo após, até completar 20 ms no total.

3.6 Bluetooth HC05

A placa HC-05, integra todo o sistema de comunicação externa via *bluetooth*, tendo apenas 4 pinos utilizados no projeto: Vcc, Gnd, Tx e Rx e utiliza comunicação serial UART. Esta placa tem a capacidade de atuar no modo *Master* ou *Slave*, porém, neste projeto se fez necessário apenas o modo *Slave*.

Estes são os principais componentes do protótipo e, normalmente, suprem as necessidades básicas de projetos como este.

Os circuitos foram montados de acordo com a diagramação da figura 8.

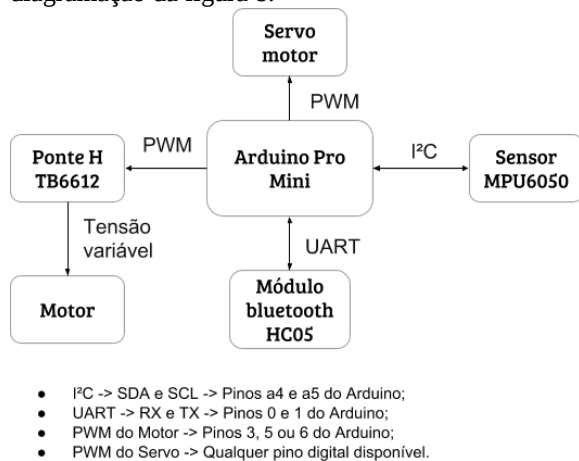


Figura 8. Diagrama Representativo da Montagem dos Módulos

Inicialmente foi construído um protótipo baseado em uma moto de brinquedo adaptada. Como o modelo não foi projetado para este fim, os testes iniciais não foram satisfatórios e após muitas tentati-

vas de correção, tomou-se a decisão de projetar um novo protótipo, corrigindo os erros encontrados.

As figuras 9 e 10 demonstram o resultado da construção do segundo protótipo. Sua construção foi feita pensando em se obter um baixo centro de gravidade, rigidez, proporcionada pelo chassi de alumínio, o mínimo de folgas quanto possível e grande *range* de esterçamento, permitindo maior controle quando necessário.

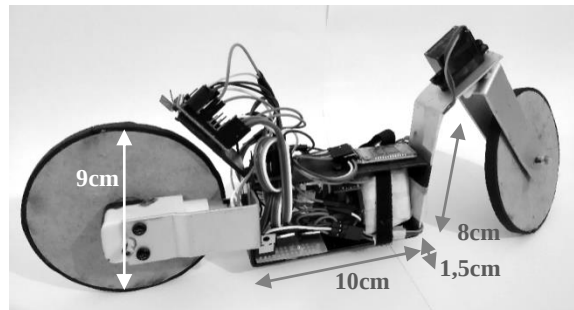


Figura 9. Protótipo Construído

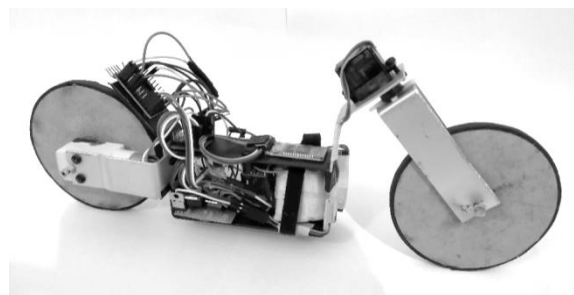


Figura 10. Protótipo Construído

4 Resultados e Discussões

Controlar um sistema bastante instável como esse exige um programa bem estruturado, rápido e um protótipo bem estruturado também. Tentar controlar o primeiro protótipo exigiu bastante esforço para identificar possíveis erros, não só de controle, mas também de imperfeições no *hardware*, como folgas, distribuição de peso e falta de rigidez estrutural.

O Segundo protótipo proporcionou melhores resultados já nos primeiros testes e, mesmo que tenha exigido alguns ajustes físicos, conseguiu-se chegar num resultado satisfatório, no qual, a partir de uma velocidade mínima medida de cerca de 0,7 m/s o equilíbrio foi mantido com a moto andando numa trajetória quase reta.

O período de amostragem mínimo do controle ficou em aproximadamente 10 ms, o que é uma taxa razoável e conseguiu proporcionar uma resposta satisfatória.

A figura 11 visa demonstrar, através de imagens capturadas de vídeo, o protótipo em equilíbrio enquanto se movimenta. (É possível ver um arame em torno da roda dianteira, o qual foi posto para proteger o garfo e a roda durante os testes)

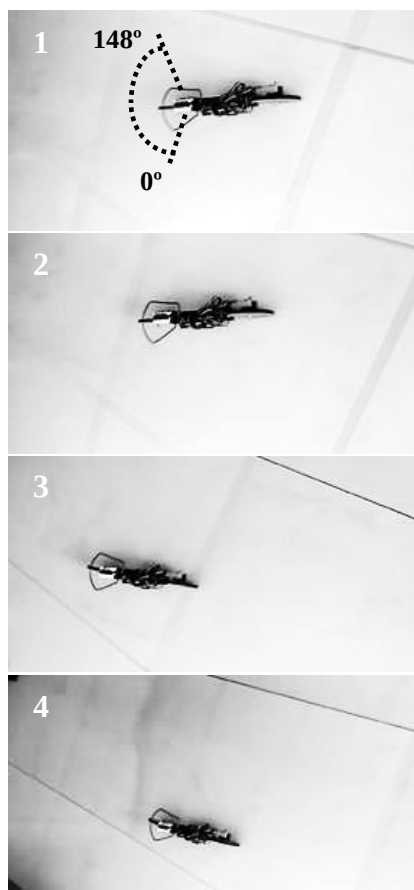


Figura 11. Capturas do protótipo em movimento

Para se ter uma ideia do comportamento do sistema em funcionamento foram plotadas algumas amostragens do erro e da posição angular de resposta do sistema, onde o eixo vertical representa valores de ângulo. Como é possível ver nas Figuras 12 e 13, o sistema tem uma resposta relativamente oscilatória que faz com que o protótipo nem sempre siga uma linha totalmente reta, no entanto se percebe que o protótipo é mantido em equilíbrio, o que atende a proposta. Percebe-se também que a média da posição angular não está exatamente em 0. Isso ocorre, pois, a distribuição de peso em relação ao eixo central do protótipo não é perfeita. No entanto, isso é corrigido através de uma calibração, na qual se mede a posição em que se estabiliza e então se altera o *setpoint*, o qual ficou estabelecido igual a $2,5^\circ$.

Todas as plotagens foram obtidas com o protótipo em movimento e cada uma é relativa a testes e amostragens distintas entre si, desta forma, os dados foram armazenados e depois foi feito o upload para serem analisados

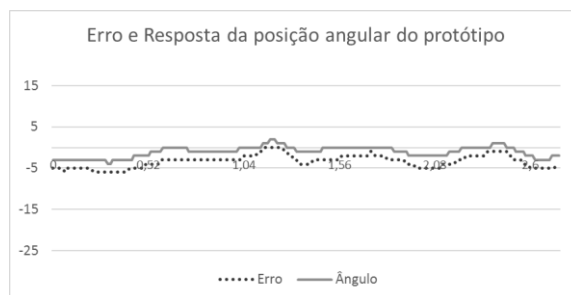


Figura 12. Plotagem da condição do sistema e do erro

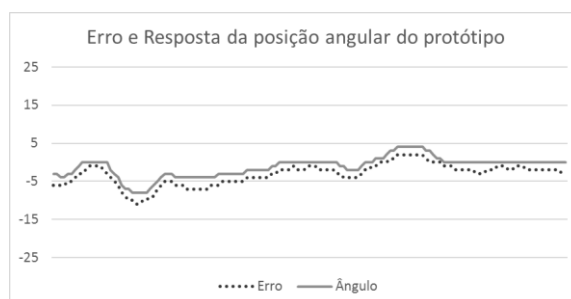


Figura 13. Plotagem da condição do sistema e do erro

Nas Figuras 14, 15 e 16 há o sinal de saída do controlador perante o erro (rótulo da direita nos gráficos). Esse sinal é o ângulo que o servo motor deve atingir (rótulo da esquerda nos gráficos), esterçando a roda dianteira e corrigindo a orientação do protótipo. O *setpoint* angular do guidão ficou estabelecido igual a 87° e o *range* de esterçamento foi limitado a 148° no total, como na imagem 1 da Figura 11.

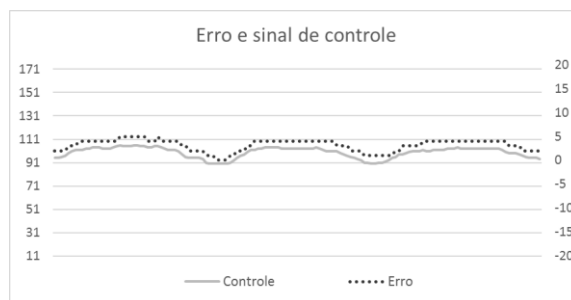


Figura 14. Plotagem do sinal de controle e do erro

É possível ver nas plotagens que o sinal de saída é acompanhado do erro, porém é um pouco suavizado devido, principalmente, à ação derivativa do controlador.

As médias dos erros, médias dos sinais de controle, e as variâncias calculadas foram, respectivamente: Figura 14: 3,17; 99,76; 1,55. Figura 15: 2,96; 99,05; 3,32. Figura 16: 2,40; 96,99; 1,32.



Figura 15. Plotagem do sinal de controle e do erro



Figura 16. Plotagem do sinal de controle e do erro

5 Conclusão

Este trabalho abordou a aplicação de controle automático do equilíbrio em um protótipo em miniatura de uma motocicleta. Inicialmente foi necessário estudar e obter um modelo físico e matemático do comportamento de um veículo como esse. Feito isso, tornou-se necessário identificar uma proposta de controle que atendesse aos requisitos iniciais do projeto. Para este projeto foi definido um controlador do tipo PD, o qual é simples e tende a acelerar e suavizar a resposta do sistema, requisito importante para o projeto.

A construção do protótipo também foi objetivo deste projeto, na qual levou-se em consideração os requisitos e os parâmetros estudados na modelagem. É importante em uma construção de protótipo, para um projeto de engenharia, sempre considerar os objetivos e os parâmetros característicos do sistema, de forma que não haja sobra e nem falta de recursos, mantendo-se a ideia de que o mais simples possível é melhor.

Levando-se em consideração o estudo do sistema, pôde-se concluir que é um sistema controlável. Diante disso, o sistema posto em prática teve o objetivo principal alcançado.

Para trabalhos futuros, poderá ser implementado o controle do protótipo em baixa velocidade ou enquanto parado, o que proporcionará novos âmbitos de controle, por exemplo, controle de posicionamento num espaço conhecido, desvio de obstáculos e refinamento e sofisticação do controlador.

Agradecimentos

Agradeço a Universidade Vila Velha (UVV) pelo apoio recebido no desenvolvimento deste projeto.

Agradeço, também, a Universidade Estadual de Campinas (Unicamp) pelo apoio na apresentação e publicação deste trabalho.

Referências Bibliográficas

- Arduino, (2017). Getting Started with Arduino and Genuino products. [Online] Available at: <https://www.arduino.cc/en/Guide/HomePage> [Accessed 20 May 2017].
- Astrom, K., Klein, R., and Lennartsson, A. (2005). Bicycle Dynamics and Control. IEEE Control Systems Magazine, (25), pp.26-47.
- Canaltech, (2017). Carros Autônomos. [Online] Available at: <https://canaltech.com.br/busca/?q=carro+autonomo> [Accessed 09 Mar. 2017].
- Halliday, D., Resnick, R. and Walker, J. (2011). Fundamentos de Física: Gravitação, Ondas e Termodinâmica. 9th ed. Rio de Janeiro: LTC, pp.2-16.
- Honda, (2017). Fun Riding at Every Speed. [Online] Available at: <https://www.honda.com/mobility/riding-assist> [Accessed 09 Mar. 2017].
- InvenSense, (2013). MPU-6000 and MPU-6050 Product Specification. [Online] Available at: <https://www.invensense.com/wp-content/uploads/2015/02/MPU-6000-Datasheet1.pdf> [Accessed 28 May 2017].
- Ogata, K. (2010). Engenharia de Controle Moderno. 5th. São Paulo: Pearson Prentice Hall.
- Sharp, R. (1971). The Stability and Control of Motorcycles. Journal of Mechanical Engineering Science, Vol. 13, pp.316-329.
- Tanaka, Y., and Murakami, T. (2004) Self Sustaining Bicycle Robot with Steering Controller. IEEE International Workshop, No. 8, pp.193-197.