

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETRÔNICA E MECÂNICA
CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM MECATRÔNICA INDUSTRIAL

CAIO CESAR DE SOUZA PEDROSO
EDUARDO LA PASTINA MODESTO

SISTEMA DE CONTROLE DE PÊNULO INVERTIDO

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA
2017

CAIO CESAR DE SOUZA PEDROSO
EDUARDO LA PASTINA MODESTO

SISTEMA DE CONTROLE DE PÊNULO INVERTIDO

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação, apresentado ao Curso Superior de Tecnologia em Mecatrônica Industrial, dos Departamentos Acadêmicos de Eletrônica e Mecânica, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, como requisito parcial para obtenção do título de Tecnólogo.

Orientador: Prof. M.Sc. Joel Gonçalves Pereira

CURITIBA
2017

TERMO DE APROVAÇÃO

CAIO CESAR DE SOUZA PEDROSO
EDUARDO LA PASTINA MODESTO

SISTEMA DE CONTROLE DE PÊNDBULO INVERTIDO

Este trabalho de conclusão de curso foi apresentado no dia 06 de dezembro de 2017, como requisito parcial para obtenção do título de Tecnólogo em Mecatrônica Industrial, outorgado pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O aluno foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. Dr. Milton Luiz Polli
Coordenador de Curso
Departamento Acadêmico de Mecânica

Prof. M.Sc. Sérgio Moribe
Responsável pela Atividade de Trabalho de Conclusão de Curso
Departamento Acadêmico de Eletrônica

BANCA EXAMINADORA

Prof. Ubiradir Mendes Pinto
UTFPR

Prof. M.Sc. Anderson Levati Amoroso
UTFPR

Prof. M.Sc. Joel Gonçalves Pereira
Orientador - UTFPR

RESUMO

PEDROSO, Caio C. de Souza; MODESTO, Eduardo La Pastina. **Sistema de controle de pêndulo invertido**. 2017. 54 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso Superior de Tecnologia em Mecatrônica Industrial) Departamentos Acadêmicos de Eletrônica e Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2017.

O pêndulo invertido é um modelo de controle de processo com inúmeras aplicações, seja industrial, bélica, aeroespacial, entretenimento, entre outras. Conhecimentos de mecânica, elétrica, eletrônica, programação e controle de processos são utilizados para a elaboração deste sistema. O objetivo do sistema de controle de pêndulo invertido é manter o equilíbrio da estrutura do pêndulo sobre duas rodas dispostas no mesmo eixo. Como o centro de gravidade está posicionado na estrutura acima do eixo do par de rodas, o sistema de pêndulo invertido é um sistema instável, dado que o mesmo tende a afastar-se da posição de equilíbrio. Para que o sistema não venha a “cair” para um lado ou para o outro, faz-se necessária a aplicação de uma força, no caso torque sobre as rodas do pêndulo. O sistema deve possuir condição de analisar para qual lado o distúrbio está ocorrendo, calcular a aceleração deste movimento de giro e acionar os motores para correção deste desequilíbrio, além de ser capaz de corrigir os distúrbios do sistema. Por tratar-se de um sistema de equilíbrio de uma massa sobre seu eixo de giro, este sistema é suscetível à instabilidade. Este trabalho de conclusão de curso tem o intuito de utilizar os conhecimentos adquiridos com as disciplinas do Curso Superior de Tecnologia em Mecatrônica Industrial, como ferramentas para elaboração e construção de um protótipo de pêndulo invertido.

Palavras-chave: Pêndulo invertido. Sistemas de controle. Sistemas instáveis.

ABSTRACT

PEDROSO, Caio C. de Souza; MODESTO, Eduardo La Pastina. **Inverted Pendulum Control System**: 2017. 54 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso Superior de Tecnologia em Mecatrônica Industrial) Departamentos Acadêmicos de Eletrônica e Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2017.

The inverted pendulum is a process control model with numerous applications, whether industrial, military, aerospace or for fun. Which knowledge of mechanics, electrical, electronics and process control are crucial for the elaboration of this system. The purpose of the inverted pendulum control system is to maintain the balance of the pendulum structure on two concentrically arranged wheels, as the center of gravity is positioned in the structure and is located above the axis of the wheel pair, the inverted pendulum system is an unstable system because it tends to move away from the equilibrium position very easily. So that the system does not fall nor to one side neither the other, it becomes necessary to apply a force, in the case of torque on the wheels of the pendulum. The system have to be able to detect to which side the disturbance is occurring, to calculate the acceleration of this turning movement and to perform the drive of the motors to correct its unbalance, besides being able to correct the disturbances of the system. Since this is a balance of a mass on its axis of rotation, the system is very susceptible to instability. This work aims to use the knowledge acquired with the subjects of the mechatronics technology course and intends to serve as a tool for the elaboration and construction of an inverted pendulum prototype.

Keywords: Inverted pendulum. Control systems. Unstable systems.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Diagrama de corpo livre de um pêndulo invertido.	15
Figura 2 - Resposta de um sistema de controle PID a um sinal degrau.	18
Figura 3 - “Balancing Robot”	21
Figura 4 - “Balanbot”	23
Figura 5 - "Joe"	24
Figura 6 - Esboço do sistema de pêndulo invertido.....	26
Figura 7 - Protótipo virtual do pêndulo invertido proposto.....	27
Figura 8 - Arduino Mega	29
Figura 9 - Plataforma de programação do Arduino	30
Figura 10 - Ponte H L298H.	31
Figura 11 - Giroscópio e acelerômetro MPU6050.	32
Figura 12 - Detalhe da forma construtiva da bateria de 9 VCC	33
Figura 13 - Bateria LIPO	34
Figura 14 - Motor 12 VCC com caixa de redução	35
Figura 15 - Diagrama elétrico do pêndulo invertido	37
Figura 16 - Sub-rotina para a leitura do sensor.....	38
Figura 17 - Função para calcular os valores de inclinação aos eixos de coordenadas	39
Figura 18 - Sub-rotina para cálculo do ângulo de inclinação do pêndulo invertido.....	40
Figura 19 - Gráfico comparativo sinal sem utilização de filtro versus sinal com utilização de filtro complementar	41
Figura 20 - Diagrama de blocos de um controlador PID.....	41
Figura 21 - Função do controlador PID.....	43
Figura 22 - Protótipo pêndulo invertido	44
Figura 23 – Gráfico resposta do pêndulo.....	46

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Lista de Hardware para Balancing Robot	22
Quadro 2 - Lista de materiais do Balanbot	23
Quadro 3 - Características do Arduino Mega	29
Quadro 4 - Características da ponte H L298H	32
Quadro 5 - Características do motor 12 Vcc com caixa de redução.....	35

LISTA DE SIGLAS

CAD	Desenho Assistido por Computador
CC	Corrente Contínua
IC	Circuito Inter Integrado
IFF	Instituto Federal Fluminense
LAI	Laboratório de Automação Inteligente
LIPO	Polímero de Lítio
PI	Proporcional Integral
PID	Proporcional Integral Derivativo
PWM	Modulação por Largura de Pulso
USB	Barramento Série Universal
VCC	Voltagem em Corrente Contínua

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	9
1.1 SISTEMA DE PÊNDELO INVERTIDO	9
1.2 MOTIVAÇÃO E JUSTIFICATIVA	10
1.3 OBJETIVO GERAL	10
1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	10
1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO	11
2 REFERENCIAL TEÓRICO	13
2.1 SISTEMAS MECÂNICOS	13
2.2 PÊNDELO INVERTIDO	14
2.3 MODELO MATEMÁTICO PÊNDELO INVERTIDO	16
2.4 TEORIA DE CONTROLE	17
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
4 ESTADO DA ARTE	21
5 DESENVOLVIMENTO	25
5.1 CONSIDERAÇÕES DE PROJETO E SELEÇÃO DOS COMPONENTES	27
5.2 DESCRIÇÃO DOS COMPONENTES	29
5.2.1 Arduino MEGA 2560	29
5.2.2 Ponte H L298N	31
5.2.3 Giroscópio e acelerômetro MPU6050	32
5.2.4 Bateria alimentação controlador e sensores	33
5.2.5 Bateria LIPO 12 VCC alimentação circuito de potência motores CC	33
5.2.6 Motor com caixa de redução 12 VCC	34
5.4 CIRCUITO ELETRÔNICO	36
5.5 PROGRAMAÇÃO	37
6 RESULTADOS	44
7 CONCLUSÃO	47
REFERÊNCIAS	49
ANEXO A – Desenho Motor 12 VDC.	51
ANEXO B – Diagrama Arduino Mega 2560	52
ANEXO C – Datasheet Arduino Mega 2560.	53
ANEXO D – Data Sheet Ponte H – L298H.	54

1 INTRODUÇÃO

Para o sistema de pêndulo invertido, a disciplina Controle de Processos Contínuos é a ferramenta principal para execução deste sistema, aplicada em diversas áreas da engenharia. Quando bem aplicados, os sistemas de controle propiciam a otimização dos processos industriais e eficácia dos processos. Diminuindo o consumo e aumentando a produtividade, contribuem para a economia dos recursos nos processos, aumentando os lucros das corporações.

Dentre os diversos modelos de processos contínuos, temos os mecanismos de pêndulo invertido, que são sistemas instáveis, uma vez que a posição do centro de gravidade fica situada acima do ponto de sustentação, ocasionando o deslocamento do pêndulo para qualquer um dos lados, exceto se for aplicada uma força no pêndulo. Forçando o mesmo a voltar para posição de equilíbrio, posição que pode ser de difícil obtenção devido à grande instabilidade do sistema.

1.1 SISTEMA DE PÊNDULO INVERTIDO

O mecanismo de pêndulo invertido é estudado nas disciplinas de controle de processos contínuos, devido ao fato de sua instabilidade. Podem-se citar como exemplos de pêndulo invertidos o sistema de controle de atitude de foguetes (o controle de atitude foguetes tem por finalidade manter o foguete na posição vertical), cadeiras de rodas motorizadas, robôs, meio de transporte individual e até em tecnologias contra abalos sísmicos em edifícios. Nosso organismo pode ser considerado também um exemplo de mecanismo de pêndulo invertido, onde o sistema vestibular executa a manutenção do equilíbrio dos vertebrados. Este foi um grande passo para a evolução da espécie humana FATTINI (2000).

Segundo Sant'ana (2017), o conceito de pêndulo invertido está sendo largamente explorado comercialmente, pelo fato de ser um sistema compacto e com um número menor de partes em relação aos sistemas convencionais. Devido a isto o conceito de pêndulo invertido tem sido amplamente utilizado para fins de locomoção humana e para o lazer. Produtos inovadores como veículos, brinquedos e robôs que utilizam o conceito de pêndulo invertido, podem ser facilmente encontrados no mercado.

1.2 MOTIVAÇÃO E JUSTIFICATIVA

O estudo do sistema de pêndulo invertido é de grande importância para a graduação do tecnólogo, uma vez que diversos sistemas e máquinas utilizam este conceito, podem ser citados, por exemplo, o sistema de guiamento de mísseis, meios de transporte alternativos em duas rodas nos quais se utilizam do balanço para o seu funcionamento. O conceito de pêndulo invertido também é aplicado na área de robótica, no desenvolvimento de robôs. Além de ser um sistema que para sua elaboração envolve diversas áreas das ciências exatas, tais como mecânica (acionamentos e estrutura do sistema), eletrônica (sensores, circuitos de controle dos motores de corrente contínua), programação (algoritmo para funcionamento do Arduino) e controle de processos (ajuste dos parâmetros de controle do sistema).

Por tratar de um tema multidisciplinar, o sistema de pêndulo invertido é uma oportunidade de demonstração física de um controle de um sistema que tende à instabilidade, e isso motivou o desenvolvimento de um protótipo de pêndulo invertido para aplicar todas as áreas do conhecimento citadas acima.

Este trabalho aborda todos os conceitos envolvidos neste sistema, também apresenta sistemas de pêndulo invertido existentes, listando seus componentes e apresentando seus princípios de funcionamento.

1.3 OBJETIVO GERAL

Realizar o estudo detalhado dos sistemas de pêndulo invertido e construir um protótipo que simule um pêndulo invertido, buscando como resultado a obtenção do equilíbrio dinâmico do sistema, utilizando um controlador PID.

1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Apresentação dos conceitos envolvidos para realização do sistema de pêndulo invertido;
- b) Estudar os sistemas de pêndulo invertido existentes atualmente;

- c) Demonstrar as diversas técnicas de controle para sistemas mecânicos;
- d) Desenvolver o programa na placa Arduino utilizando seus recursos de processamento;
- e) Obter os parâmetros ótimos para o PID do pêndulo;
- f) Obter componentes comerciais para confecção do protótipo;
- g) Realizar adequações dos componentes para atendimento das respostas aos impulsos do controle do sistema;
- h) Fabricação de um protótipo de pêndulo invertido, que além de manter o equilíbrio, deva ser capaz de absorver distúrbios.

1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está organizado da seguinte forma:

Capítulo 1 - Introdução

Apresenta o tema deste trabalho, apresenta a motivação e a justificativa de sua realização. Também apresenta o objetivo geral e os objetivos específicos. Na introdução foi inserido esta estrutura do trabalho, para demonstração sucinta de todos os capítulos que o compõem.

Capítulo 2 – Referencial teórico

Neste capítulo apresenta-se os conceitos teóricos dos principais componentes para elaboração e confecção de um sistema de pêndulo invertido. O capítulo salienta a importância de conhecer a teoria dos sistemas de pêndulo invertido, para desenvolvimento do controlador e posteriormente a sua aplicação no protótipo.

Capítulo 3 – Revisão bibliográfica

Pretende demonstrar os sistemas de pêndulo invertido que foram desenvolvidos anteriormente à realização deste trabalho. Serve de ferramenta para a elaboração da melhor concepção para o sistema que será confeccionado.

Capítulo 4 – Estado da arte

Este capítulo mostra trabalhos realizados para o sistema de pêndulo invertido, apresentando os trabalhos que possuem a concepção de montagem semelhante à concepção do protótipo que pretende-se construir.

Capítulo 5 – Desenvolvimento

Apresenta como o trabalho foi realizado, relaciona os componentes selecionados e

utilizados para a confecção do protótipo, apresentando os desafios, as adequações necessárias e o planejamento da malha de controle do sistema.

Capítulo 6 - Resultados

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos do sistema pêndulo invertido proposto. Após o embasamento teórico e o aprendizado empírico com o protótipo, observou-se que a resposta ao impulso unitário estava muito lenta, sendo necessária a alteração do sistema mecânico para obtenção do equilíbrio. Outro ponto críticos deste sistema é a programação, para chegar ao melhor PID para o sistema instável e sem o modelo matemático do sistema, utilizou-se a resposta ao impulso do sistema.

O resultado esperado com a elaboração deste trabalho é apresentar um protótipo funcional e que o sistema funcione de forma otimizada.

Capítulo 7 - Conclusão

Capítulo com as conclusões do sistema, com base nos resultados obtidos. Apresentação de algumas sugestões para futuros trabalhos a serem realizados sobre a plataforma do sistema.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo são apresentados os conceitos teóricos dos principais componentes para elaboração e confecção de um sistema de pêndulo invertido.

2.1 SISTEMAS MECÂNICOS

Segundo Ogata (2000), qualquer sistema mecânico é basicamente regido pela segunda lei de Newton. Ela pode ser aplicada a quaisquer sistemas mecânicos.

A massa de um corpo é a quantidade de matéria nele existente e que se supõe ser constante. Do ponto de vista físico, massa é a propriedade que associa ao corpo sua inércia, isto é, a oposição à partida e à parada de movimento do corpo. Todo corpo é atraído pela Terra e a magnitude da força que a Terra exerce sobre o corpo é dita o seu peso.

Em situações práticas, sabe-se o peso w de um corpo, mas não sua massa m . Calcula-se a massa de um corpo a partir da expressão:

$$m = \frac{w}{g} \quad (1)$$

Sendo g a constante de aceleração gravitacional. O valor de g varia ligeiramente de um ponto a outro da superfície da Terra. Em decorrência desse fato, o peso de um corpo varia ligeiramente de um ponto a outro, mas sua massa permanece constante. Para fins de engenharia, o valor de g é $9,81 \text{ m/s}^2$.

Numa posição do espaço afastada da Terra, os corpos se tornam sem peso. Sua massa, contudo, permanece a mesma e, por conseguinte, os corpos continuam possuindo inércia.

A força é uma grandeza física que pode ser definida como a causa que tende a modificar o movimento de um corpo sobre o qual ela age.

Para se movimentar um corpo é necessário aplicar-lhe uma força. Dois tipos de força são capazes de agir sobre um corpo: forças de contato e forças de campo. Forças de contato são aquelas que entram diretamente em contato com o corpo, enquanto as forças de campo, tais como a força gravitacional e a força magnética, agem sobre os corpos sem entrar em contato com estes OGATA (2000).

2.2 PÊNULO INVERTIDO

O modelo clássico de pêndulo invertido consiste em uma haste fixada em uma base móvel, essa haste é fixada em apenas um ponto, portanto este é um sistema instável em termos de equilíbrio.

A posição vertical de um mecanismo de pêndulo invertido é instável devido ao centro de gravidade estar situado acima do ponto de articulação, com isso, a haste tende a girar para uma das direções, exceto se for aplicada uma força na base móvel que sustenta a haste OGATA (2000).

A velocidade do motor da base móvel deve ser suficiente para equilibrar a haste, porém não é possível manter o equilíbrio da haste sem aplicar uma força na base móvel, mesmo que a haste esteja na posição vertical. Portanto é necessário construir um controlador PID que regule a força aplicada na base do pêndulo invertido.

Para isso, deve ser feita uma modelagem matemática do sistema, nesse caso são usados os princípios de mecânica geral para levantar as equações que descrevem a dinâmica desse sistema.

Para este trabalho, o protótipo foi construído de forma diferente do modelo clássico citado acima, porém as estratégias de controle são semelhantes. Neste caso, as velocidades dos motores são controladas a fim de se obter a estabilidade do pêndulo. Pela complexidade do sistema, o modelo matemático é de difícil obtenção, sejam pelas dificuldades de geometrias e diferentes centros de massas dos componentes, ou pelos distúrbios, como escorregamento dos motores, folgas das transmissões de engrenagens, ruídos dos sinais dos sensores, etc.

A Figura 1 mostra o diagrama de corpo livre do pêndulo invertido, onde estão representadas as forças atuantes no sistema, incluindo a força u aplicada a base móvel para equilibrar a haste.

Supondo que o centro de gravidade da haste situa-se em seu centro geométrico, é possível deduzir a equação que descreve o movimento da haste. Considerando que o ângulo da haste seja θ , a posição do centro de gravidade (x_g, y_g) dentro do plano xy é:

$$x_g \tag{2}$$

$$y_g = l \cos \theta \tag{3}$$

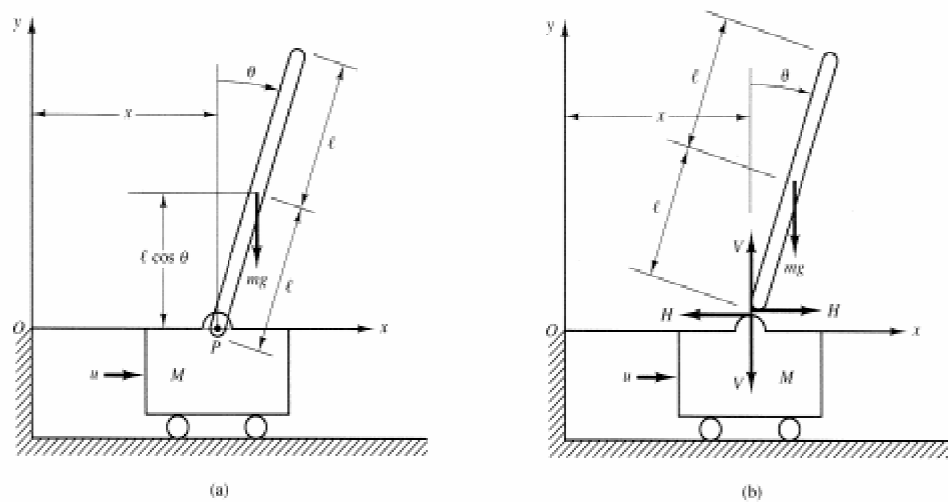


Figura 1 - Diagrama de corpo livre de um pêndulo invertido.

Fonte: Ogata (2000).

Para calcular a velocidade angular em relação ao seu centro de gravidade, é considerado o diagrama de corpo livre acima, portanto:

$$I \theta' = V l \sin \theta - H l \cos \theta \quad (4)$$

Onde I corresponde ao momento de inércia da haste em relação ao seu centro de gravidade.

O movimento horizontal do centro de gravidade da haste é dado pela equação:

$$m \frac{d^2}{dt^2} (x + l \sin \theta) = H \quad (5)$$

O movimento vertical do centro de gravidade da haste é dado pela equação:

$$m \frac{d^2}{dt^2} (l \cos \theta) = V - mg \quad (6)$$

O movimento do suporte móvel pode ser expresso por:

$$M \frac{d^2 x}{dt^2} = u - H \quad (7)$$

Admitindo-se que o ângulo Θ seja muito pequeno, as equações (3) a (6) podem ser linearizadas:

$$I\theta'' = Vl\theta - Hl \quad (8)$$

$$m(x'' + l\theta'') = H \quad (9)$$

$$0 = V - mg \quad (10)$$

$$Mx'' = u - H \quad (11)$$

Das equações (8) e (10) obtém-se:

$$u = Mx'' + H$$

$$u = Mx'' + m(x'' + l\theta'')$$

$$u = (M + m)x'' + ml\theta'' \quad (12)$$

E das equações (7) e (9) obtém-se:

$$I\theta'' = mgl\theta - Hl$$

Usando a equação (8):

$$I\theta'' = mgl\theta - ml(x'' + l\theta'')$$

$$mgl\theta = I\theta'' + mlx'' + ml^2\theta''$$

$$mgl\theta = \theta''(I + ml^2) + mlx'' \quad (13)$$

Portanto, as equações (11) e (12) determinam o movimento do conjunto do pêndulo invertido.

2.3 MODELO MATEMÁTICO PÊNDULO INVERTIDO

Para aproximação do modelo matemático do sistema do pêndulo invertido, utilizamos a função delta ou impulso unitário, segundo Ogata (2000), a função impulso unitário consiste

em aplicar um pulso no sistema com magnitude muito grande e tempo de duração muito pequena. Este conceito é bastante útil na derivação de funções descontínuas. A função impulso unitário pode ser considerada a derivada da função degrau unitário no ponto de descontinuidade. Com o conceito de função impulso torna-se possível derivar uma função contendo descontinuidades, obtendo-se impulsos cujas magnitudes são iguais à amplitude de cada uma das descontinuidades correspondentes. Portanto conhecendo-se a resposta ao impulso unitário do sistema, tem-se condição de calcular a resposta do sistema a qualquer impulso de entrada.

2.4 TEORIA DE CONTROLE

O controle automático tem desempenhado um papel vital no avanço da engenharia e ciência. Além de sua extrema importância para os veículos espaciais, para os sistemas de guiamento de mísseis, sistemas robóticos e similares, o controle automático tornou-se uma parte importante e integrante dos processos industriais e de manufatura modernos. Por exemplo, o controle automático é essencial no comando numérico de máquinas-ferramentas das indústrias manufatureiras, no projeto de sistemas de pilotagem automática da indústria aeroespacial e no projeto de automóveis e caminhões da indústria automobilística. É ainda essencial nas operações industriais tais como: controle de pressão, temperatura, umidade, viscosidade e vazão nas indústrias de processo . (Ogata 2000)

Ogata (2000) apresenta algumas definições sobre alguns componentes de um sistema de controle:

- A variável controlada é a grandeza ou a condição que é medida e controlada.
- A variável manipulada é a grandeza ou a condição variada pelo controlador de modo a afetar o valor da variável controlada.
- Um sistema a controlar ou planta, é uma parte de um equipamento, eventualmente um conjunto de itens de uma máquina que funcionam juntos e cuja finalidade é desempenhar uma determinada operação.
- Um distúrbio ou perturbação é caracterizado por um sinal que tende a afetar de modo adverso o valor da variável de saída de um sistema. Se um distúrbio for gerado internamente no sistema, ele é dito um distúrbio interno; ao passo que um distúrbio

externo é produzido fora do sistema e se comporta como um sinal de entrada no sistema.

Segundo o artigo da National Instruments (2016), dentro de um sistema de controle em malha fechada, a variável de processo é o parâmetro do processo que deve ser controlado. Para que seja possível o controle, a variável de processo deve ser medida por um sensor que por sua vez envia o sinal para o controlador. A diferença entre o valor medido pelo sensor e o *setpoint* é usado pelo controlador para calcular o valor de saída, que será enviada a um atuador, onde controlará o valor da variável de processo. Um sistema de controle deve ser projetado também para minimizar os efeitos de distúrbios, sejam eles externos ou internos.

Dentro de um projeto de um controlador, existem parâmetros de desempenho, os quais devem ser levados em consideração durante o projeto de um controlador.

Na Figura 2 é exibida a resposta da variável de processo a um sinal de uma função tipo degrau:

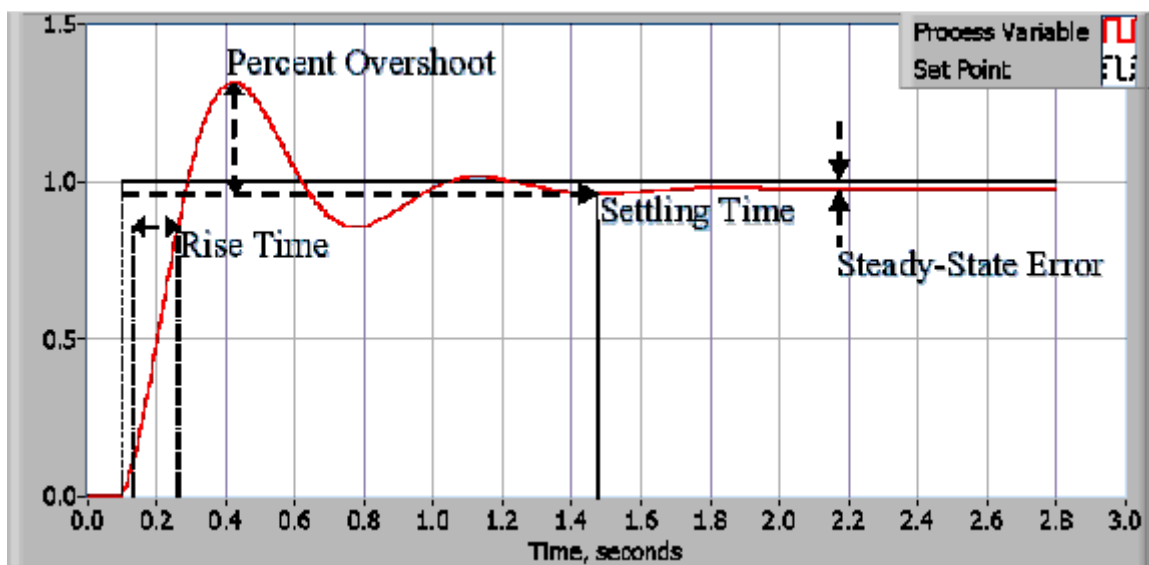


Figura 2 - Resposta de um sistema de controle PID a um sinal degrau.

Fonte: National Instruments (2016).

O tempo de subida (*Rise Time*) é o tempo em que a variável de processo leva para ir de 10% a 90% do valor do *setpoint*. O valor de *overshoot* é a porcentagem em que a variável de processo ultrapassa o *setpoint*. O *setting time* é o tempo em que o valor da variável de processo estabiliza próximo ao valor do *setpoint* (normalmente 95% do valor do *setpoint*),

dentro da teoria de controle é utilizado o termo **regime estacionário** o momento em que a variável de processo estabiliza. O erro de regime estacionário é a diferença entre o valor da variável de processo e *setpoint* após a estabilização da variável de processo.

O algoritmo PID é o mais utilizado dentro dos sistemas de controle industriais devido a sua robustez e confiabilidade. O valor de saída do sistema é dado através das ações proporcional, integral e derivativa, que em conjunto mantém a variável de processo controlada. A componente proporcional depende apenas da diferença entre a variável de processo e o *setpoint*, ou seja, o erro. A taxa de saída do controlador é proporcional ao sinal de erro, um aumento no coeficiente proporcional (K_c) gera uma resposta mais rápida do controlador, porém um valor muito alto de K_c torna o sistema instável (oscilatório). A componente integral soma o erro ao longo do tempo, com isso a ação integral aumenta com o tempo a menos que o erro seja zero, tendendo a eliminar o erro de regime estacionário. Algo importante a ser notado é a saturação do controlador com o efeito integral, caso o erro não vá a zero em determinado tempo.

A ação derivativa como o nome já diz, deriva o erro ao longo do tempo. Ela é proporcional à taxa de variação de erro do sistema, respondendo a variações bruscas na variável de processo. Um aumento no coeficiente derivativo (K_d) significa um aumento na velocidade global de resposta do sistema, porém, se K_d for muito alto, fará com que o controlador fique instável devido a ruídos e distúrbios.

Existem várias maneiras de ajustar os parâmetros de um controlador PID, pode ser na tentativa e erro ou calculando as equações que regem o sistema a controlar.

Na maioria das vezes é possível determinar os coeficientes do controlador com o método de tentativa e erro, quando se sabe os efeitos de cada ação de controle. Uma maneira de se conseguir o ajuste adequado é primeiramente, deixa-se os coeficientes integral e derivativo em 0, depois o coeficiente proporcional é aumentado até que o sistema fique oscilatório, em seguida, aumenta-se o coeficiente integral até que o erro de regime estacionário seja eliminado. Pode-se utilizar o ganho derivativo para tornar a resposta do controlador mais rápida. Um ajuste fino pode ser feito após a sintonização para se alcançar os requisitos de desempenho do controlador, como *overshoot*, tempo de subida, por exemplo.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Vários trabalhos de sistemas de pêndulo invertido foram realizados, seguem alguns comentários dos autores de alguns trabalhos.

Projeto de controlador *fuzzy* para o experimento de pêndulo invertido. GRILLO (2017)

Os autores desenvolveram um controlador *fuzzy* para aplicação no kit didático *Feedback*® 33-005 que se encontra no Laboratório de Automação Inteligente (LAI) do Instituto Federal Fluminense (IFF). Esta plataforma consiste de um carro- pêndulo que optou pela lógica *fuzzy*, pelo motivo da mesma trabalhar com sistemas não lineares e instáveis e não precisar de um modelo da planta, facilitando a sintonia do controlador.

O trabalho acima serve de ferramenta para a etapa de programação do sistema proposto. Uma vez que o trabalho citado encontrou diversas dificuldades semelhantes às encontradas no sistema, e também apresenta diversas soluções que podem ser aplicadas a este.

Pêndulo Invertido Autocontrolado SANT'ANA (2017).

Neste trabalho o autor descreve o processo de desenvolvimento de um protótipo de pêndulo invertido autocontrolado. Neste trabalho o autor utiliza acelerômetro e giroscópio para sensoriamento da inclinação do sistema. Para o controle o autor utilizou um processador ARM LPC2148, dotado de diversos periféricos, um deles para controle PWM dos motores corrente contínua que o autor utilizou para o sistema.

A concepção apresentada deste trabalho, ficou muito semelhante à concepção adotada para o protótipo. Foram utilizados os mesmos princípios de sensoriamento e controle do sistema, porém o processador utilizado foi o Arduino.

4 ESTADO DA ARTE

Neste capítulo são apresentados os pêndulos invertidos fabricados por acadêmicos e entusiastas da área de mecatrônica. Mediante as diversas concepções de sistemas de pêndulo invertido existentes, pode-se selecionar a melhor concepção para o sistema proposto.

“Balancing Robot “ (Arduino) de David Ingraham e Barrett Anderies, BARRETT, DAVID (2017)

O artigo de *Barrett Anderies e David Ingraham* descreve a construção de um robô de equilíbrio, Figura 3. Esta parte dos mesmos princípios que o popular sistema de transporte de duas rodas *Segway*. Ou seja, acelera e desacelera as rodas para manter todo o sistema na posição vertical. Neste protótipo os autores utilizaram uma estrutura impressa em 3D. O código incorpora um controlador PID e um filtro *Kalman*. O código do controlador PID usado era da Biblioteca PID Arduino e o filtro *Kalman* se utilizava nesse projeto. O objetivo principal deste projeto conforme os autores é aprender a escrever e usar um filtro de *Kalman*.

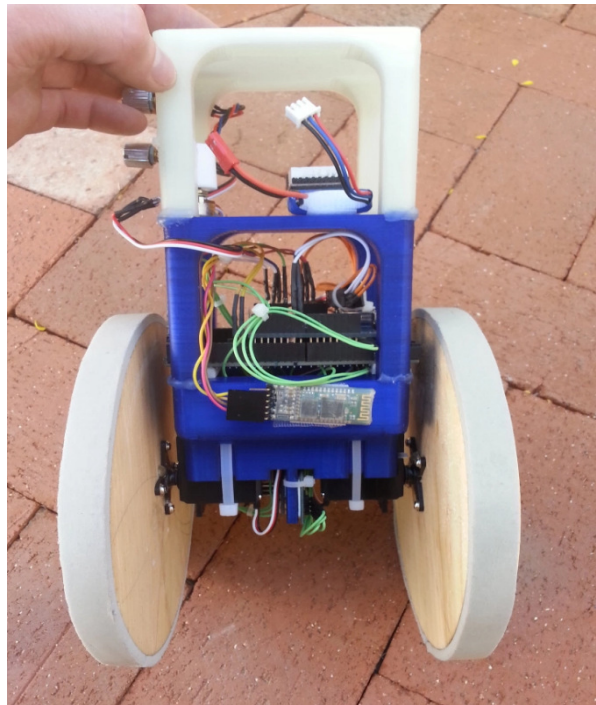


Figura 3 - “Balancing Robot”

Fonte: Barrett's Projects (2017)

A Quadro 1 apresenta a lista de *hardware* para este sistema.

Qtde	Descrição
1	Arduino Mega 2560
1	Proteção do host USB
1	Dongle Bluetooth
2	Servos contínuos
1	Placa de sensor de acelerador e acelerador de uso duplo (consiste em um acelerômetro ADXL345 de 3 eixos e um giroscópio analógico ADW2207)
	Transceptor Bluetooth (para telemetria)
1	2S (2 células) bateria de polímero de lítio
1	Alarme de baixa tensão da bateria LIPO
3	Potenciômetros (para sintonizar o controlador PID),
1	Quadro de sua escolha
1	Variedade de fecho de correr
1	Variedade de fios e jumpers
2	Rodas que devem possuir um diâmetro de aproximadamente 7 polegadas

Quadro 1 - Lista de Hardware para *Balancing Robot*

Fonte: *Barrett's Projects (2017)*

“*Balanbot*” de *Steve Chang, Ryan Qin e Bruce Chen. CHANG (2017).*

O *Balanbot*, mostrado na Figura 4, é, segundo Chang, Qin e Chen, um *kit* de robô auto equilibrado baseado em Arduino. Os autores pretenderam facilitar o trabalho de quem deseja construir um robô de equilíbrio, fazendo um kit com peças para a construção do hardware do sistema e fornecendo o software do robô. Este *kit* é disponível para venda, demonstrando o potencial comercial dos sistemas de pêndulos invertidos. Como o programa do arduino é aberto e o *hardware* é fácil de montar, esse *kit* é específico para crianças e entusiastas. Mas serve de parâmetro para o desenvolvimento do sistema deste trabalho. Por utilizar estruturas acrílicas fortes, o robô é mantido equilibrado usando seu centro de gravidade. Para alcançar o alto desempenho, os autores testaram vários motores de torque-engrenagem para garantir que o robô mantenha o equilíbrio e se mova com flexibilidade mesmo que seja empurrado de repente.

O *hardware* deste sistema, consiste em dois motores de engrenagem de alto torque e alta velocidade, rodas, estruturas acrílicas, suporte de bateria 18650, *Balance Shield* e placa compatível com Arduino UNO, uma placa acrílica de 5 mm e duas de 3 mm de espessura e outros acessórios para sua estrutura principal.

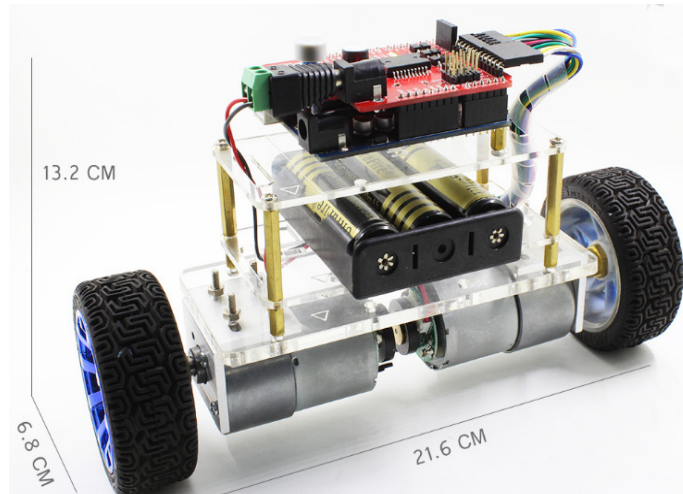


Figura 4 - “Balanbot”

Fonte: Chang(2017)

O Quadro 2 mostra a lista de hardwares para este sistema.

Quantidade	Componente
1	Arduino Uno
1	Dongle Bluetooth
2	Acionamento com motores 12 VDC
1	Balance Shield
1	Transceptor Bluetooth (para telemetria)
1	Bateria 18650 12VDC

Quadro 2 - Lista de materiais do *Balanbot*

Fonte: Chang(2017)

“JOE: *A Mobile, Inverted Pendulum*” de Grasser, F. GRASSER (2017)

O projeto Joe, mostrado na Figura 5, é um exemplo de implementação de um sistema de controle para pêndulo invertido de alta precisão e desempenho. O sistema é baseado em dois controladores de espaço de estado, um responsável pelo controle da estabilidade e deslocamento para frente e para trás, e outro responsável pelo controle de movimentação sobre o próprio eixo. Testes com alguns tipos de sensores mostraram que o sensor de inclinação tem um tempo de resposta muito lento para esta aplicação. Acelerômetros são muito suscetíveis a ruídos, gerando erros nas leituras e o giroscópio é eficaz na rejeição de ruídos em aplicação desta natureza, porém seu erro de medição residual pode levar as medições incorretas ao longo do tempo. Por isso o ideal é a utilização do giroscópio em associação com acelerômetros, resultando em medidas sem ruído e sem erros acumulativos ao

longo do tempo. Segundo os autores, a implementação de um sistema de controle adaptativo, usando lógica *Fuzzy*, por exemplo, traria uma melhora significativa para o desempenho do protótipo.



Figura 5 - "Joe"

Fonte: Grasser (2017)

5 DESENVOLVIMENTO

Nesse trabalho, foram utilizadas as técnicas de controle de processos contínuos que foram estudadas durante as disciplinas de teoria de controle do curso de tecnologia em mecatrônica industrial com o objetivo de obter a estabilidade de um mecanismo de pêndulo invertido.

O protótipo do pêndulo invertido foi montado sobre duas rodas paralelas, acima delas estão todos os componentes do protótipo, como o processador, o acelerômetro e o circuito de alimentação dos motores. Essa disposição de montagem se configura como um sistema de pêndulo invertido.

Foram revisados conceitos de mecânica geral, com o principal foco em dinâmica e teoria de controle, com ênfase no estudo das respostas em regime estacionário nos controladores.

O desenvolvimento do projeto foram divididos em etapas, seguindo a seguinte ordem:

- a) Elaborar os desenhos do sistema de pêndulo invertido em CAD;
- b) Esboçar o diagrama de corpo livre a fim de calcular as forças resultantes do sistema e assim determinar o equilíbrio dinâmico do pêndulo;
- c) Testar os sensores e motores do projeto;
- d) Desenvolver programa do pêndulo invertido, incluindo a sub-rotina do controlador PID;
- e) Realizar a análise matemática do sistema, calculando os coeficientes do PID para este sistema;
- f) Obter os coeficientes do controlador PID para obter o equilíbrio do pêndulo, utilizando o método de sintonização *Ziegler-Nichols*;
- g) Fazer a sintonia fina do controlador PID;

A Figura 6 mostra um esboço do sistema que foi montado em cima de uma base com roda, onde abaixo é situado o controlador PID, que foi programado no Arduino, o acelerômetro fica montado na parte inferior do protótipo próximo ao eixo. Na parte superior foram montadas as baterias, uma de 9 VCC para a alimentação do Arduino e uma de 12 VCC para a alimentação dos motores, e o acelerômetro.

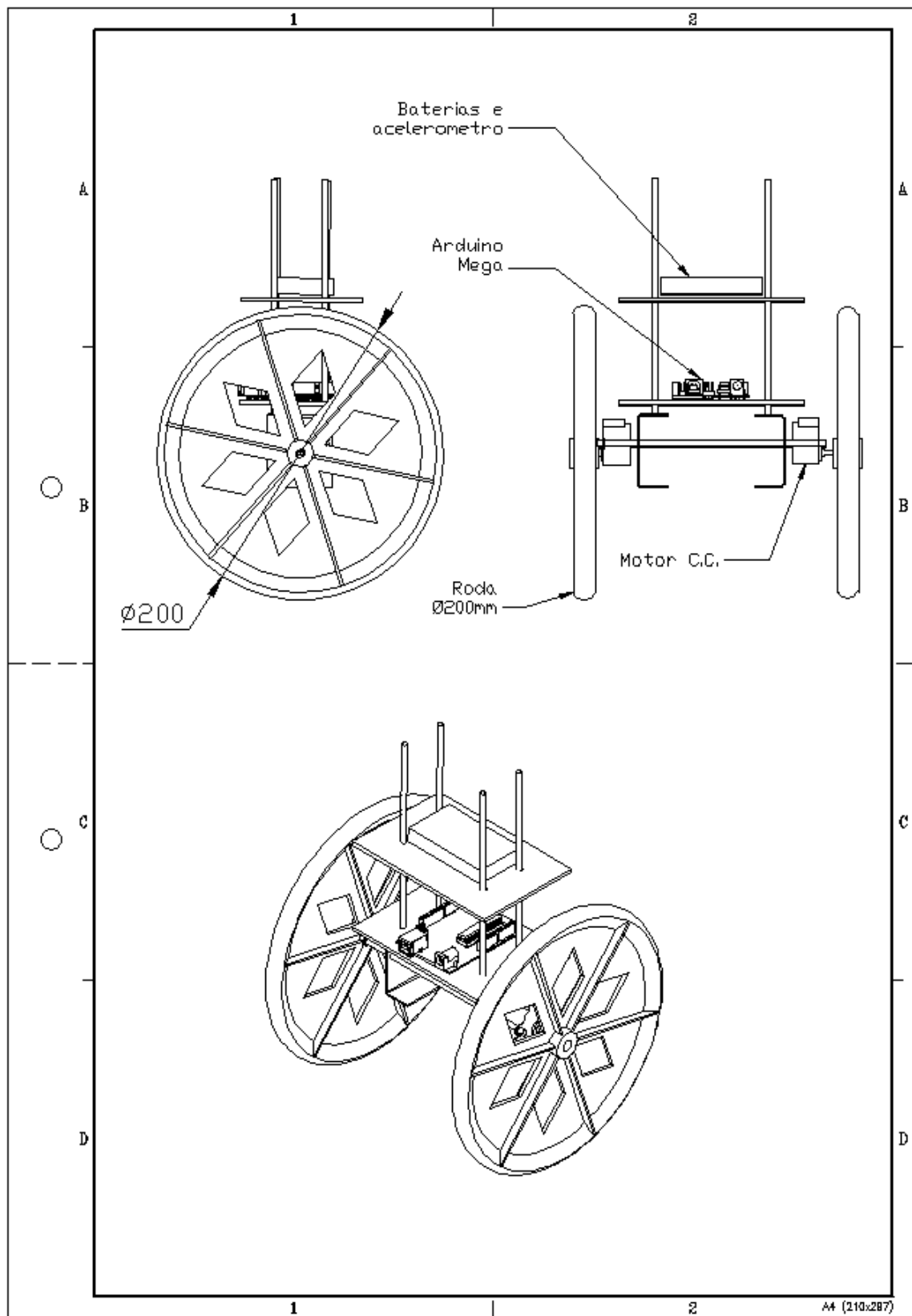


Figura 6 - Esboço do sistema de pêndulo invertido.

Fonte: Autoria Própria

Para o desenvolvimento do esboço e levantamento da posição do centro de massa do protótipo utilizou-se da ferramenta INVENTOR, *software* de modelagem virtual, a Figura 7 apresenta uma imagem tridimensional do protótipo virtual, pode-se notar a posição do centro de massa do protótipo, ponto com os vetores x, y e z.

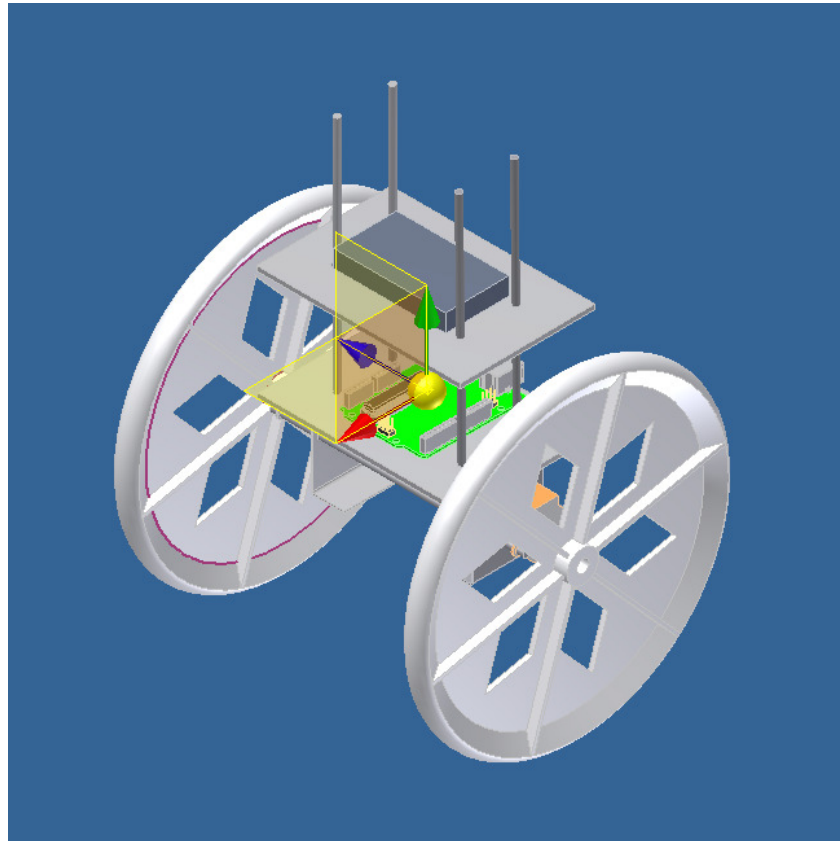


Figura 7 - Protótipo virtual do pêndulo invertido proposto

Fonte: Autoria própria

5.1 CONSIDERAÇÕES DE PROJETO E SELEÇÃO DOS COMPONENTES

Para a fabricação de um protótipo de pêndulo invertido o maior problema é a seleção dos componentes para compor o sistema físico do pêndulo. Devido ao fato de se ter disponível somente componentes comerciais para a execução do protótipo, para que o pêndulo funcionasse perfeitamente, alguns elementos tiveram suas características originais alteradas, para que fosse obtida a otimização do sistema.

O sistema mecânico do pêndulo, é relativamente simples, consta de um par de rodas, um par de motores 12 VCC, um par de reduções de engrenagens e uma estrutura para fixação dos

componentes eletrônicos e das baterias do sistema.

Encontrar a melhor relação entre a potência do motor, a redução de engrenagens e o diâmetro das rodas foi crucial para o perfeito funcionamento do sistema. Para o sistema em questão no qual é necessário um torque elevado e aceleração do sistema também elevado, foram feitas algumas considerações para que se chegasse ao conjunto mecânico que tivesse seus componentes padronizados e que atendesse da melhor forma as considerações abaixo citadas.

Para as rodas, foi considerado que rodas com diâmetro maior fornecem maior torque, isso porque o momento de inércia é maior. Outro ponto é a aceleração radial do sistema que também deve ser alta, com rodas de maior diâmetro também conseguimos maior aceleração, devido ao perímetro da roda ser maior, com menos rotação do motor temos maior percurso de correção do pêndulo.

Para a redução, foi considerada uma redução menor, para ter maior aceleração das rodas do pêndulo, com redução menor perde-se torque, mas consegue-se maior aceleração, o que é bom quando temos menor ângulo de inclinação onde o torque é menor, para inclinações maiores necessita-se de maior torque. Como a intenção é manter o equilíbrio e obter resposta a pequenos distúrbios, a redução menor traz um melhor resultado.

Para o motor, consideramos motores de 12 VCC, devido a facilidade de obtenção e altas velocidades.

Para a estrutura, foi considerado que a massa deve estar a mais alta possível para que a ação de controle seja a ação principal para a condição de equilíbrio do sistema, por este motivo posicionar as baterias no ponto mais alto é melhor para a condição de instabilidade.

O sistema eletrônico é mais complexo para dimensionamento. Atualmente existe uma grande variedade de recursos eletrônicos que podem ser utilizados.

Para o processamento dos sinais dos sensores e comando dos motores foi escolhido o microcontrolador ATmega 2560, montado sobre uma placa Arduino Mega 2560. A placa Arduino se mostrou como a melhor opção por possuir 54 pinos de entradas e saídas digitais, 16 pinos de entradas analógicas, oscilador de cristal de 16 MHz, conexão USB, botão de reset, oscilador PWM, interface I2C para a comunicação com o acelerômetro e giroscópio além de outros recursos que deixam compacta a montagem do sistema eletrônico.

5.2 DESCRIÇÃO DOS COMPONENTES

5.2.1 Arduino MEGA 2560

O Arduino Mega 2560 Figura 8, é um hardware de linguagem aberta, que possui um microcontrolador ATmega 2560. Pode-se alimentá-lo pela conexão USB ou com uma fonte externa. Este Arduino possui 54 pinos de entradas ou saídas digitais de no máximo 40mA, ele possui também 16 pinos de entradas analógicas, com 10 bits de resolução, faixa de 0 a 5 volts. Mais informações sobre o arduino seguem no anexo III (catálogo arduino Mega). No quadro 3, seguem as especificações técnicas do Arduino:

Microcontrolador	ATmega2560
Tensão de alimentação	5V
Tensão de entrada (recomendada)	7-12V
Tensão de entrada (limites)	6-20V
Pinos digitais I/O	54 (dos quais 14 podem ser saídas PWM)
Pinos de entrada analógica	16
SRAM	8 KB
EEPROM	4 KB
Velocidade de Clock	16 MHz

Quadro 3 - Características do Arduino Mega

Fonte: Arduino (2017)

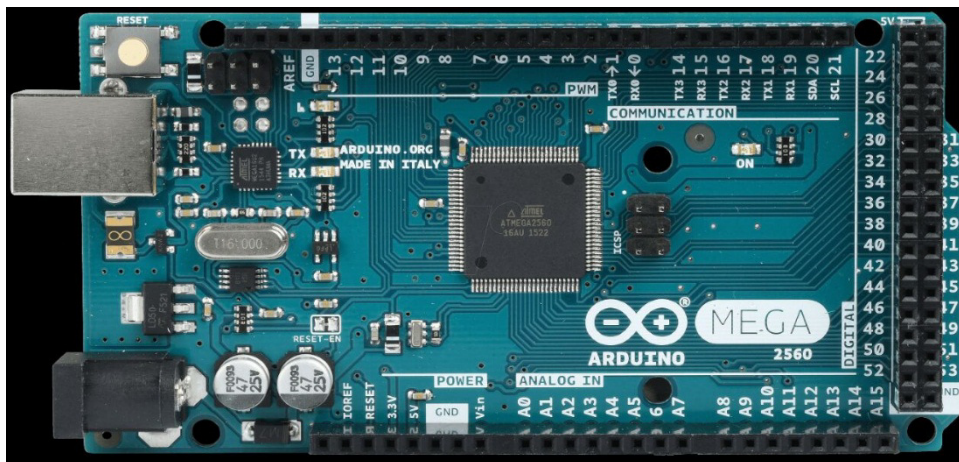


Figura 8 - Arduino Mega

Fonte: Arduino (2017)

O Arduino Mega2560 pode ser programado com o software do Arduino, software disponível gratuitamente pelo fabricante. A Figura 9 mostra a imagem da interface do software. A linguagem de programação utilizada no Arduino é derivada da linguagem C, este programa compila o programa gerado na linguagem em C, o compilamento é a tradução do software para a linguagem de máquina, linguagem que o processador Atmega2560 consegue processar.

The image shows the Arduino IDE interface. The title bar reads "Button | Arduino 1.0.1". The menu bar includes "File", "Edit", "Sketch", "Tools", and "Help". Below the menu bar is a toolbar with icons for opening files, saving, and running. The main workspace contains a C++ sketch for a button and LED. The code is as follows:

```
*/  
  
// constants won't change. They're used here to  
// set pin numbers:  
const int buttonPin = 2;    // the number of the pushbutton pin  
const int ledPin = 13;     // the number of the LED pin  
  
// variables will change:  
int buttonState = 0;       // variable for reading the pushbutton status  
  
void setup() {  
  // initialize the LED pin as an output:  
  pinMode(ledPin, OUTPUT);  
  // initialize the pushbutton pin as an input:  
  pinMode(buttonPin, INPUT);  
}  
  
void loop(){  
  // read the state of the pushbutton value:  
  buttonState = digitalRead(buttonPin);  
  
  // check if the pushbutton is pressed.  
  // if it is, the buttonState is HIGH:  
  if (buttonState == HIGH) {  
    // turn LED on:  
    digitalWrite(ledPin, HIGH);  
  }  
  else {  
    // turn LED off:  
    digitalWrite(ledPin, LOW);  
  }  
}
```

The status bar at the bottom indicates "1" on the left and "Arduino Mega 2560 or Mega ADK on COM17" on the right.

Figura 9 - Plataforma de programação do Arduino

Fonte: Autoria própria

5.2.2 Ponte H L298N

A Ponte H L298N, na Figura 10, é um drive de potência para motores de corrente contínua. Controla a velocidade de dois motores corrente de contínua (CC), utilizando os pinos PWM do Arduino. THOMSEN (2013)

Sua função é de interface entre os pinos de saída PWM do Arduino e os motores 12 VCC, está interface é um drive de ponte cheia dupla de alta tensão projetada para controlar cargas indutivas, como motores CC, quando ligado aos pinos de saída PWM do Arduino, controla a rotação dos motores. Pelo motivo das correntes dos motores ser de 430 mA muito maior que o limite de corrente das saídas do Arduino que é de 40 mA, para a interligação entre esses dois componentes faz-se necessária esta interface. STMICROELETRONICS (2000)

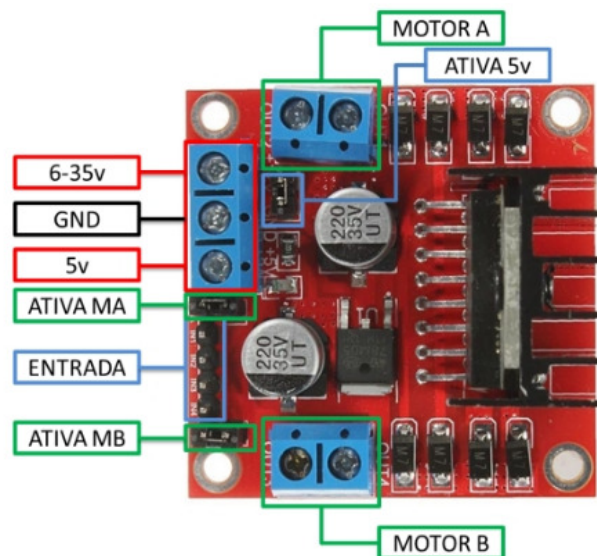


Figura 10 - Ponte H L298H.

Fonte: Thomsen (2013).

No Quadro 4, estão contidas as especificações técnicas desse circuito de ponte H L298N.

Descrição	Característica
Tensão de Operação	5-35 Vdc
Chip	ST L298N
Saída	2 motores DC ou 1 motor de passo
Corrente de Operação máxima	2A
Tensão lógica	5 Vdc
Corrente lógica	0-36 mA
Limites de Temperatura	-20 à +135° C
Potência máxima	25 W
Dimensões	43 x 43 x 27mm
Peso	30 g

Quadro 4 - Características da ponte H L298H

Fonte: STMicroelectronics (2000)

5.2.3 Giroscópio e acelerômetro MPU6050

A Figura 11 mostra a placa do giroscópio e acelerômetro MPU6050.

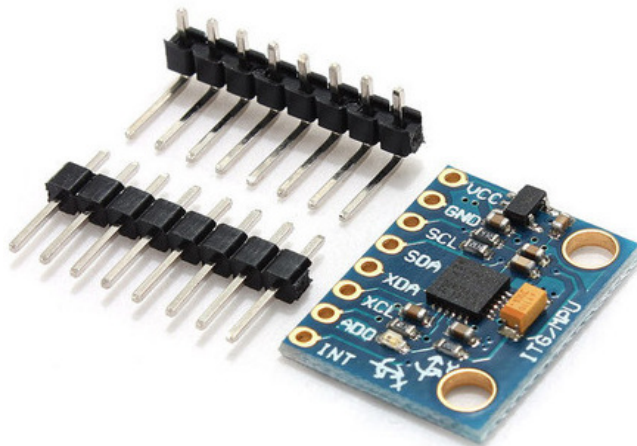


Figura 11 - Giroscópio e acelerômetro MPU6050.

Fonte: *Thomsen* (2013).

5.2.4 Bateria alimentação controlador e sensores

Na Figura 12, pode-se observar a bateria alcalina de 9 VCC, utilizada para alimentação do Arduino Mega e do Giroscópio. Esta bateria é um arranjo em série de 6 pilhas de 1,5 VCC cada SANTOS (2013)

As pilhas alcalinas, utilizadas nas baterias de 9 VCC, diferem das pilhas de zinco/dióxido de manganês pelo motivo da substância química obtida da reação ser alcalina o que facilita a transferência de elétrons. Aumentando a capacidade de corrente e a vida útil das pilhas OFICINA (2019)



Figura 12 - Detalhe da forma construtiva da bateria de 9 VCC

Fonte: Santos(2013)

5.2.5 Bateria LIPO 12 VCC alimentação circuito de potência motores CC

LIPO, abreviação de *Lithium Polymer* (polímero de lítio) é uma bateria que possui eletrólitos de sais de lítio retidos em um polímero sólido como o óxido de polietileno e o poliacrilonitrilo ao invés de solvente, o que possibilita sua adaptação a diferentes formatos além de altas taxas de descarga FRENCH (2015)

As baterias LIPO, Figura 13, oferecem uma ótima relação peso x armazenamento de energia, mas existem alguns pontos negativos que precisam ser levados em consideração:

- Baterias LIPO possuem um tempo de vida curta, durando entre 300 e 500 ciclos de carga e descarga ou menos dependendo do cuidado do usuário;

- Esse tipo de bateria pode pegar fogo ou explodir, se for mal utilizada pelo usuário. Portanto, não podem ser furadas, amassadas, sofrerem curto-circuito ou sobrecargas;
- Requerem cuidado especial para armazenamento;
- A carga, a descarga ou a maneira como é armazenada afeta diretamente o tempo útil de vida da bateria;
- Esse tipo de bateria não pode ser completamente descarregada;
- Precisa de carregador especial, próprio para baterias LIPO MOLINA(2015)

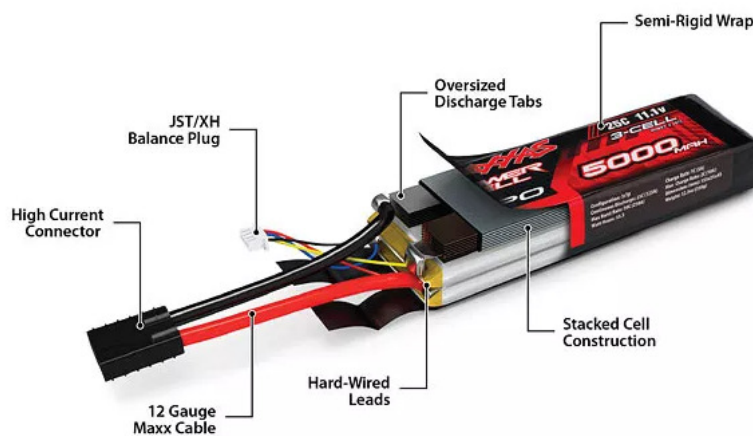


Figura 13 - Bateria LIPO

Fonte: French (2015)

5.2.6 Motor com caixa de redução 12 VCC

Os motores de corrente contínua (CC) transformam as forças de atração e repulsão dos eletroímãs e ímãs permanentes, em movimento de rotação. Os motores utilizados no protótipo possuem a característica de possuir baixas rotações e alto torque de saída, o qual é dotado de uma caixa de redução. Caixa com uma redução de transmissão feita por engrenagens de dentes retos, redução que diminui a velocidade e aumenta o torque de saída da conjunto motor e redução. Os motores CC possuem maior facilidade de controle, melhor linearidade de rotação CHAPMAN(2013).

Na Figura 14, temos a imagens de um conjunto motor e caixa de redução.



Figura 14 - Motor 12 VCC com caixa de redução

Fonte: Henrique (2013)

No Quadro 5, estão as características técnicas do conjunto motor e caixa de redução utilizado no protótipo.

Descrição	Característica
Torque	11,10 Kgf.cm
Rotação	83 RPM
Tensão Nominal	12 Vdc
Potência	5 W
Corrente	430 mA
Tensão de operação	6-24 Vdc
Peso	300 g

Quadro 5 - Características do motor 12 Vcc com caixa de redução

Fonte: Henrique (2013)

5.3 MONTAGEM DO PROTÓTIPO

Para a montagem da estrutura do protótipo, foram utilizadas placas de acrílico e barras roscadas, os componentes do pêndulo foram dispostos através dessas placas. O giroscópio e acelerômetro foram fixados na parte inferior do protótipo, o mais próximo possível do eixo de rotação dos motores, para que não fosse necessário fazer compensações na leitura do ângulo do pêndulo.

A placa de Arduino foi fixada na placa inferior do protótipo, o circuito de potência foi fixado na placa superior e as baterias na parte inferior da última placa.

Foram utilizados cabos do tipo *flat* para melhorar a organização do circuito. O protótipo possui duas baterias, uma de 9 VCC para a alimentação do Arduino e outra de 12V para a alimentação do circuito de potência.

Foram utilizadas duas rodas de diâmetro de 120 milímetros encontradas em carrinhos de compras, eles são relativamente leves e possui um perímetro que facilita o controle do equilíbrio do pêndulo. Elas foram montadas paralelamente e diretamente fixadas nos motores de corrente contínua.

5.4 CIRCUITO ELETRÔNICO

O circuito do pêndulo invertido foi dividido basicamente em duas partes, sendo eles o circuito de potência e o circuito de comando, composto pelo Arduino, sensores e a bateria de 9V, o diagrama da Figura 15 apresenta com maiores detalhes o circuito completo do protótipo.

No circuito de potência, os motores foram ligados a saída do circuito da ponte H, sendo ela comandada pelas saídas PWM do Arduino, a alimentação desse circuito é feito pela bateria LIPO.

No circuito de comando, o giroscópio e acelerômetro MPU-6050 foram conectados nos pinos de interface I2C do Arduino Mega. A alimentação do MPU-6050 é feita pelo pino de alimentação 3,3VCC disponível no Arduino e os sinais dos eixos X, Y e Z foram conectados nas entradas analógicas do Arduino. A bateria de 9 VCC fornece a alimentação ao circuito.

O funcionamento do circuito consiste em adquirir os valores da inclinação do pêndulo invertido e enviar os sinais ao Arduino, onde o mesmo faz a conversão dos valores lidos em graus, o controle do equilíbrio do pêndulo usando o controlador PID e aciona as saídas PWM do Arduino para controlar a velocidade dos motores.

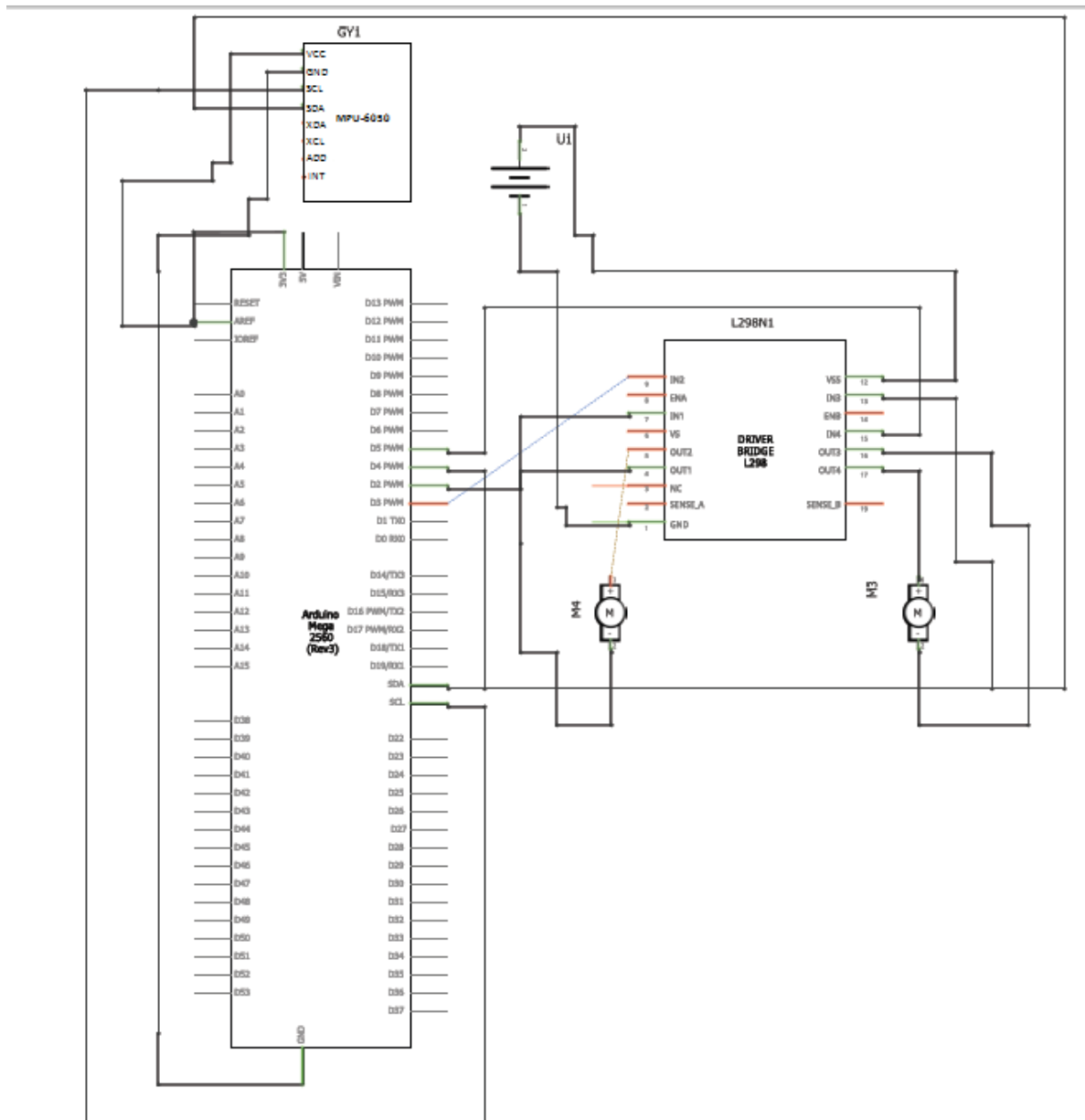


Figura 15 - Diagrama elétrico do pêndulo invertido

Fonte: Autoria própria

5.5 PROGRAMAÇÃO

O controlador utilizado para realizar o controle do equilíbrio do pêndulo foi o Arduino. Essa plataforma utiliza uma linguagem de programação própria, derivada da linguagem C. Inicialmente, o programa foi dividido em partes, de maneira semelhante ao que foi feito no circuito, para facilitar o seu desenvolvimento.

Foram criadas sub-rotinas para testar os componentes do protótipo, como o

acelerômetro e os motores com o objetivo de integrar essas funções dentro do programa posteriormente.

Para o acionamento dos motores, foram utilizadas as saídas PWM do Arduino, essas saídas estão com o símbolo ~ ao lado da numeração do pino correspondente. Essas saídas PWM são digitais e, portanto, são utilizadas variáveis inteiras para realizar o controle de velocidade dos motores de corrente contínua.

Para controlar a velocidade dos motores, não foi necessário criar uma sub-rotina para cálculo de *Duty-Cicle* do PWM, pois o Arduino faz isso automaticamente, basta escrever um valor inteiro para as saídas PWM do Arduino.

Para a leitura dos sinais dos sensores, foram utilizados pinos de interface I2C e a biblioteca *Wire.h* para a comunicação com o MPU-6050. Além disso foi utilizada outra biblioteca, que é específica para a comunicação Arduino com o Giroscópio MPU-6050. Foram criadas algumas variáveis de teste para a leitura dos valores das coordenadas.

O acelerômetro e giroscópio MPU-6050 realiza a leitura dos valores de posição e aceleração dos eixos X, Y e Z e armazena em endereços de memória. Para acessá-los foi utilizada a sub-rotina *readSensor()*, essa sub-rotina não retorna nenhum valor para o programa, apenas lê os valores que estão na memória do MPU-6050 utilizando o comando *Wire.read()* da biblioteca *Wire.h* e escreve nas variáveis inteiras criadas para as posições e acelerações em cada eixo, além dos valores dos eixos é possível até ler a temperatura medida pelo MPU-6050 no endereço 0x41. Para cada valor, são reservados 16 bits dentro da memória do acelerômetro, conforme observa-se na Figura 16.

```
void readSensor()
{
  wire.beginTransmission(MPU);
  wire.write(0x3B); // starting with register 0x3B (ACCEL_XOUT_H)
  wire.endTransmission(false); //Request data from sensor
  wire.requestFrom(MPU,14,true);

  //Save the sensors' values in their respective variables
  AcX=wire.read()<<8|wire.read(); //0x3B (ACCEL_XOUT_H) & 0x3C (ACCEL_XOUT_L)
  AcY=wire.read()<<8|wire.read(); //0x3D (ACCEL_YOUT_H) & 0x3E (ACCEL_YOUT_L)
  AcZ=wire.read()<<8|wire.read(); //0x3F (ACCEL_ZOUT_H) & 0x40 (ACCEL_ZOUT_L)
  Tmp=wire.read()<<8|wire.read(); //0x41 (TEMP_OUT_H) & 0x42 (TEMP_OUT_L)
  GyX=wire.read()<<8|wire.read(); //0x43 (GYRO_XOUT_H) & 0x44 (GYRO_XOUT_L)
  GyY=wire.read()<<8|wire.read(); //0x45 (GYRO_YOUT_H) & 0x46 (GYRO_YOUT_L)
  GyZ=wire.read()<<8|wire.read(); //0x47 (GYRO_ZOUT_H) & 0x48 (GYRO_ZOUT_L)
}
```

Figura 16 - Sub-rotina para a leitura do sensor.

Fonte: Autoria própria

As variáveis AcX, AcY e AcZ armazenam os valores de ângulo lidos pelo sensor e GyX, GyY e GyZ armazenam os valores de aceleração em relação a cada eixo.

Foi utilizada a sub-rotina *updateSensor()* para calcular os valores de inclinação em relação em cada eixo de coordenadas usando a média de dez medições, como é possível observar na Figura 17.

```
void updateSensor()
{
    long y = 0;
    long z = 0;
    long gx = 0;
    for(int i=0; i<10; i++)
    {
        readsensor();
        y += AcY;
        z += AcZ;
        gx += GyX;
    }
    Y = y/10 - Y0;
    Z = z/10 - Z0;
    GX = gx/10 - GX0;
    delay(1);
}
```

Figura 17 - Função para calcular os valores de inclinação aos eixos de coordenadas

Fonte: Autoria própria

Após armazenados os valores das leituras feitas pelo sensor, é possível usá-los para calcular o ângulo de inclinação, porém, existem alguns problemas característicos na utilização do MPU-6050, não só nesse, mas também em quaisquer acelerômetros e giroscópios, que são os ruídos e as imprecisões de medição do giroscópio e do acelerômetro. Para garantir a precisão das medições feitas pelos sensores, é necessária a utilização de filtros. Existem várias maneiras de filtrar os sinais do sensor, no caso deste trabalho foi escolhido utilizar o filtro complementar pela sua relativa facilidade de utilização e sua eficiência.

No filtro complementar, é feita a combinação das leituras do acelerômetro e do giroscópio utilizando o cálculo integral, a ação do filtro está descrita pela fórmula abaixo:

$$\hat{\text{Ângulo}} = 0,98 * \text{leitura do giroscópio} + 0,02 * \text{leitura do acelerômetro}$$

É importante notar que o valor da leitura do giroscópio foi convertido em um valor de ângulo primeiramente para depois ser utilizado no cálculo do filtro, como é possível observar na Figura 18.

O filtro complementar foi implementado através da função *calculateAngle()*, na qual utiliza os valores de ângulo e velocidade angular para o cálculo da inclinação do pêndulo. No final da sub-rotina, o resultado é armazenado na variável *AnglePID*, a qual é utilizada no controlador PID do projeto.

```
void calculateAngle()
{
  updateSensor();
  float pitch, pitchAcc;
  pitch += (GX/65.536) * dt; //131.072
  pitchAcc = arctan2(Y,Z)*180/pi;
  pitch = pitch * 0.98 + pitchAcc * 0.02;
  anglePID = pitch;
}

int arctan2(int y, int x) {
  int coeff_1 = 128;
  int coeff_2 = 3*coeff_1;
  float abs_y = abs(y)+1e-10;
  float r, angle;

  if (x >= 0) {
    r = (x - abs_y) / (x + abs_y);
    angle = coeff_1 - coeff_1 * r;
  } else {
    r = (x + abs_y) / (abs_y - x);
    angle = coeff_2 - coeff_1 * r;
  }
  if (y < 0)      return int((-angle*360)/1024); // in degrees
  else           return int((angle*360)/1024); // in degrees
}
```

Figura 18 - Sub-rotina para cálculo do ângulo de inclinação do pêndulo invertido

Fonte: Autoria própria

Após a aplicação do filtro complementar é possível constatar a diferença entre o sinal não filtrado e o sinal filtrado, no gráfico da Figura 19. O sinal sem o filtro possui muitos ruídos, acarretando na instabilidade do sistema, por consequência, a utilização do filtro complementar foi crucial para a obtenção do equilíbrio do pêndulo.

O valor armazenado em *AnglePID* é utilizado no controlador PID como entrada do mesmo, o valor do *setpoint* é comparado com aquele e então a diferença entre os dois, o erro, é controlado pelo PID até que se chegue na estabilidade do sistema, abaixo, na Figura 20 é mostrado o diagrama de blocos que representa o controlador PID desenvolvido para este projeto.

Existem várias maneiras de calcular os coeficientes de um PID para a estabilidade, pode ser calculando os pólos da função de transferência, tentativa e erro, etc.

No caso do projeto proposto, foi utilizado o método de *Ziegler-Nichols* para obter os

valores dos coeficientes do controlador PID.

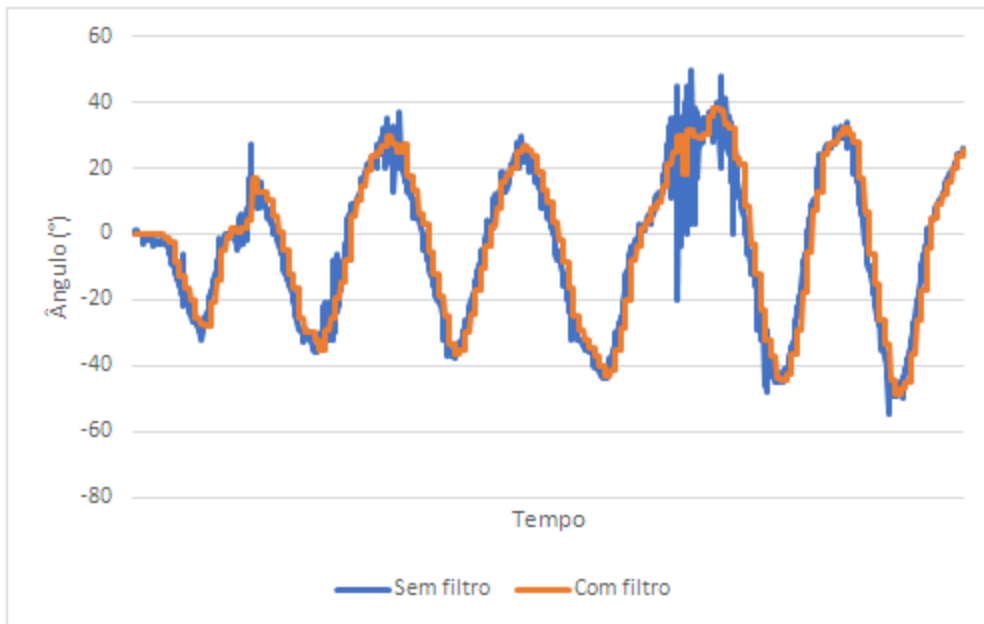


Figura 19 - Gráfico comparativo sinal sem utilização de filtro versus sinal com utilização de filtro complementar

Fonte: Autoria própria

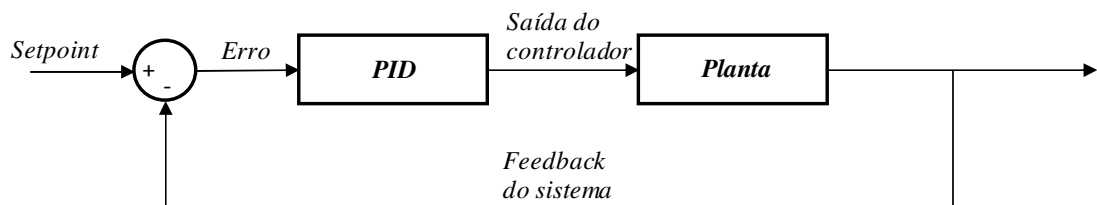


Figura 20 - Diagrama de blocos de um controlador PID

Fonte: Autoria própria

Este método consiste em estimar os coeficientes utilizando os tempos de resposta do sistema, primeiramente são obtidos os valores do tempo de resposta a um impulso, depois, são utilizadas as fórmulas para calcular os coeficientes, conforme a Tabela 1.

Tabela 1 - Método de Ziegler-Nichols para malha fechada

Tipo de Controlador	Kp	Ti	Td
P	0,5Kcr	∞	0
PI	0,45Kcr	$\frac{Pcr}{1,2}$	0
PID	0,6Kcr	0,5Pcr	0,125 Pcr

Fonte: Autor (2017)

Nesse caso, foi utilizado o método para malha fechada, onde primeiramente são encontrados o ganho e o tempo crítico do sistema, para isso, os tempos integral e derivativo são colocados em 0 e em seguida, o ganho proporcional é aumentado gradativamente até que se chegue em uma resposta oscilatória, obtendo assim o ganho crítico, após chegar no ganho crítico \square_{\square} , obtém-se os outros ganhos através da tabela, de acordo com o tipo de controlador utilizado, para este projeto, foi utilizado o controlador do tipo *PI*. Logicamente com esses parâmetros não se obtém o melhor desempenho do pêndulo, porém, chega-se a valores nos quais se obtém parâmetros satisfatórios de *overshoot* e *rise time*.

Após o uso do método, foram obtidos os seguintes valores para o controlador:

$$K_p = 8,5$$

$$K_I = 0,4$$

Os coeficientes obtidos pela aplicação do método Ziegler-Nichols foram adicionados à função *PIDControl(float setpoint, float kp, float ki, float kd)*, como é possível observar na Figura 21.

```

void PIDControl(float setpoint, float kp, float ki, float kd)
{
    float error,proportionalTerm,integralTerm,derivativeTerm;
    error = setpoint - anglePID;
    proportionalTerm = kp * error;
    integratedError += error;
    integralTerm = ki * constrain(integratedError,-255,255);
    derivativeTerm = kd * (error - lastError);
    lastError = error;
    signal = constrain(proportionalTerm + integralTerm + derivativeTerm, -255, 255);
    PWMMotor = signal;
}

void driveMotor()
{
    if(PWMMotor > 0)
    {
        analogwrite(motor1Pin1, PWMMotor);
        analogwrite(motor1Pin2, 0);
        analogwrite(motor2Pin1, PWMMotor);
        analogwrite(motor2Pin2, 0);
    }
    if(PWMMotor < 0)
    {
        analogwrite(motor1Pin1, 0);
        analogwrite(motor1Pin2, abs(PWMMotor));
        analogwrite(motor2Pin1, 0);
        analogwrite(motor2Pin2, abs(PWMMotor));
    }
}

```

Figura 21 - Função do controlador PID

Fonte: Autoria própria

A função calcula o valor de saída do controlador PID de acordo com valor medido pelo acelerômetro, essa saída é escrita para os pinos PWM do Arduino para então controlar o pêndulo.

O valor de saída dessa função é um inteiro entre -255 e 255, como a saída PWM do Arduino é de 8 bits, o valor de saída da função deve ser limitado entre esses valores, caso contrário, ações inesperadas podem ocorrer com o pêndulo.

No *loop* principal foi utilizado uma base de tempo de 10 ms, essa base de tempo serve de referência para todas as funções do programa, como a leitura da posição do pêndulo pelo acelerômetro e a função do controlador PID.

6 RESULTADOS

Na Figura 22, está o protótipo do pêndulo invertido, tema deste trabalho. Com a disposição dos componentes acima das placas de acrílico conforme projetado no protótipo virtual:

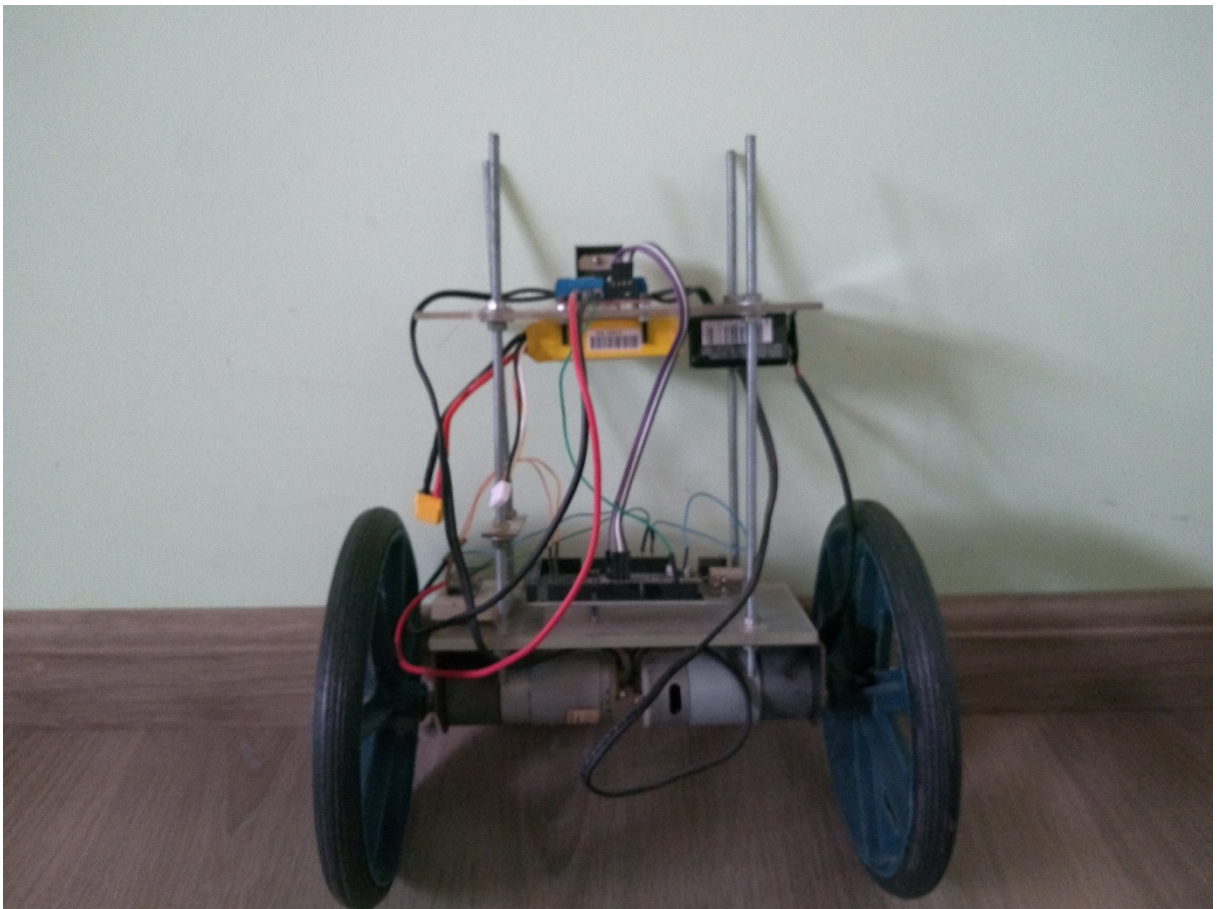


Figura 22 - Protótipo pêndulo invertido

Fonte: Autoria Própria

O protótipo montado apresentou um resultado satisfatório. Permaneceu em equilíbrio mesmo sujeito a distúrbios produzidos por agentes externos (movimentação manual, vento e outros). Antes de chegar ao resultado esperado, foram encontrados alguns problemas relativos a escolha dos componentes e na programação, que não foram observados anteriormente no momento da elaboração do projeto, alterações nas características originais dos componentes foram necessárias para o sucesso do trabalho, além da correção nas falhas de programação que foram encontradas durante a implementação do controlador PID.

A alteração da relação de engrenagens obteve um resultado significativo para o sucesso do sistema. Com a redução original onde conseguia-se 83 RPM, o sistema não possuía condições de responder aos distúrbios, por causa do grande tempo de resposta para esta condição. Após a alteração da redução, onde foi obtido uma rotação de 186 RPM nas rodas, o tempo de resposta foi reduzido, conseguindo o sistema dessa forma, manter o equilíbrio e ter resposta a distúrbios.

Outro problema encontrado durante o desenvolvimento do projeto, foi a instabilidade do sistema durante a implantação do controlador PID no programa. O sistema tornava-se instável de maneira repentina quando o PID agia e a inclinação do pêndulo passava de cerca de 15° , com isso, os motores giravam de maneira aleatória e era impossível levantar estimativas para fazer a correção dos coeficientes do controlador PID. Após a análise do programa, foi percebido um erro de programação na sub-rotina que escreve o valor de saída do PID para os pinos de saída do Arduino, a sub-rotina retornava um valor inteiro (16 bits) para os pinos PWM do Arduino, sendo que os mesmos podem receber apenas uma variável de 8 bits, como consequência, para valores acima de 255, os 8 bits mais significativos eram perdidos e então apenas os bits menos significativos eram escritos nos pinos, acarretando em movimentos “aleatórios” do pêndulo. Para corrigir essa falha, foi utilizado a função *constrain(int1,int2)*, essa função limita os valores de uma variável para os valores dos argumentos da função quando essa variável ultrapassar os valores do intervalo definido por eles.

Como pode ser observado na Figura 23, temos o gráfico da resposta do pêndulo a aplicação de um distúrbio, no caso rotação da estrutura sobre o eixo dos acionamentos.

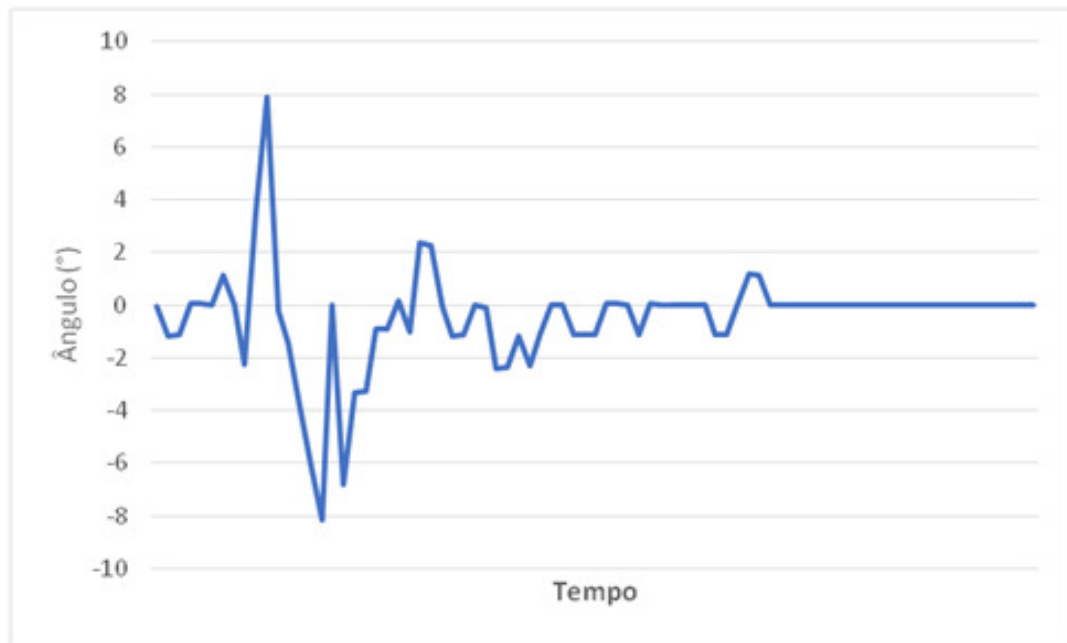


Figura 23 – Gráfico resposta do pêndulo

Fonte: Autoria Própria

7 CONCLUSÃO

Com a finalização da pesquisa teórica, a construção do protótipo e a programação do software de controle, pode-se concluir quais foram os principais desafios para a execução desse sistema, os pontos onde se pode melhorar e a capacidade comercial que o sistema de pêndulo invertido possui.

O grande número de artigos e sistemas pertinentes ao tema que estão disponíveis, facilitou a pesquisa teórica.

A seleção e aquisição dos componentes que compõem o hardware trouxeram alguns desafios, isto devido ao fato que os itens comerciais disponíveis no mercado não atendiam as especificações do sistema.

Um dos problemas que dificultaram a elaboração da ação de controle, foram as folgas das engrenagens dos sistemas de transmissão utilizados, também soma-se a estas folgas os escorregamentos dos motores de indução. Estes são os exemplos dos problemas mecânicos encontrados. Acrescenta-se a estes os ruídos dos sinais dos sensores e o atraso das respostas aos distúrbios do sistema, tendo assim um sistema instável. Somente após a utilização da resposta ao impulso, e da inclusão de filtros no programa, o sistema adquire estabilidade.

Além disso, foi difícil conseguir componentes que atendessem as demandas do projeto e realizar a interface entre os componentes dentro do programa. Para a resolução desses problemas, foi necessária a alteração das características originais dos motores, conforme já foi comentado anteriormente e as alterações nos programas com relação as falhas cometidas.

Como o protótipo manteve-se em equilíbrio, a resposta do sistema não convergiu para a instabilidade e conhecimentos das disciplinas cursadas no curso superior de Tecnologia em Mecatrônica Industrial foram utilizadas, pode-se dizer que os objetivos propostos para execução deste trabalho foram alcançados.

7.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Considerando que o sistema apresentou resultado satisfatório referente à condição de manter o equilíbrio, o próximo passo é o desenvolvimento de um sistema para controle do movimento do pêndulo de forma remota. Sistema que permita controlar o pêndulo, fazendo-o movimentar para frente e para trás, realizar curvas e posteriormente ser capaz de subir e descer superfícies inclinadas.

REFERÊNCIAS

Balanbot. “**Balanbot best Arduino Self Balancing Robot.**” *Indiegogo*. Disponível em: <<https://www.indiegogo.com/projects/balanbot-best-arduino-self-balancing-robot-ever#/>>. Acesso em: 23 jun 2017.

Barrett's Projects. “**Balancing Robot Arduino.**” *Barrett Projects*. Disponível em: <<https://barrettsprojects.wordpress.com/2014/03/11/balancing-robot-arduino/> > . Acesso em: 23 jun 2017.

Chapman, Stephen J. *Fundamentos de Máquinas Elétricas*. Porto Alegre - RS: AHGH, 2013.

Fattini, Dangelo e. *Anatomia Básica dos Sistemas Orgânicos*. São Paulo: Novo Atheneu, 2000.

French, Sally. “**Bateria LIPO, O que você precisa saber.**” *Doctor Drone*. Disponível em: <<http://doctordrone.com.br/bateria-lipo-o-que-voce-precisa-saber/> >. Acesso em: 12 out 2017.

Grasser, Felix. “**JOE: A Mobile, Inverter Pendulum.**” *Citeseerx*. Disponível em: <<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download>>. Acesso em: 14 jun 2017.

Grillo, Farlen. “**Controlador FUZZY para pêndulo invertido.**” *Bd.Centro. IFF*. Disponível em: <<http://bd.centro.iff.edu.br/bitstream>>. Acesso em: 14 jun 2017.

Henrique, Rafael. “**Micromotor DC com caixa de redução.**” *Neomotion*. Disponível em: <<http://www.neomotion.com.br/micromotor-dc/micromotor-dc-c-caixa-de-reducao/>>. Acesso em: 15 out 2017).

Molina, Marcelo. “**Aprenda mais sobre as baterias Lipo.**” *Molrc*. Disponível em: <<http://www.molrc.com/?p=104> >. Acesso em: 10 nov. 2017.

National Instruments. “**Explicando a Teoria PID.**” *NI*. Disponível em: <<http://www.ni.com/white-paper/3782/pt/>>. Acesso em: 14 nov 2016.

Oficina, Pontociência. “Ponto ciência.” **Conhecendo o interior da bateria 9 V**. Disponível em: <<http://pontociencia.org.br/experimentos/visualizar/conhecendo-o-interior-da-bateria-de-9v/372>> . Acesso em: 15 nov. 2017.

Ogata, K. **Engenharia de controle moderno**. Rio de Janeiro: Prentice-Hal, 2000.

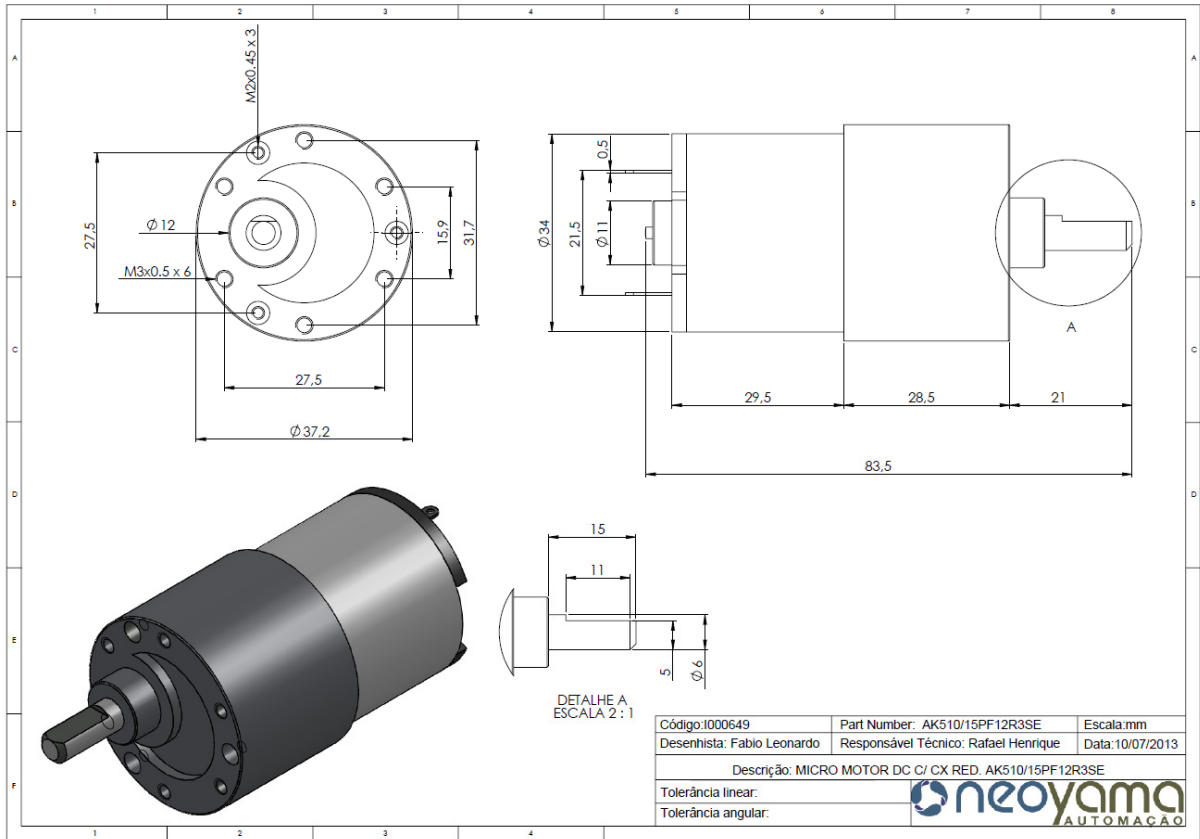
Sant'ana, Pedro Henrique. “**Pêndulo invertido autocontrolado.**” *Unifieo*. Disponível em: <[https:// www.unifieo.br/files/0805egcpr.pdf/](https://www.unifieo.br/files/0805egcpr.pdf/) > . Acesso em: 02 nov. 2017.

Santos, Josué. “**Você sabe a diferença entre pilhas e baterias.**” *Tecwhite*. Disponível em: <<http://www.tecwhite.net/2013/05/voce-sabe-diferenca-entre-pilhas-e-bateria.html>>. Acesso em: 15 nov. 2017.

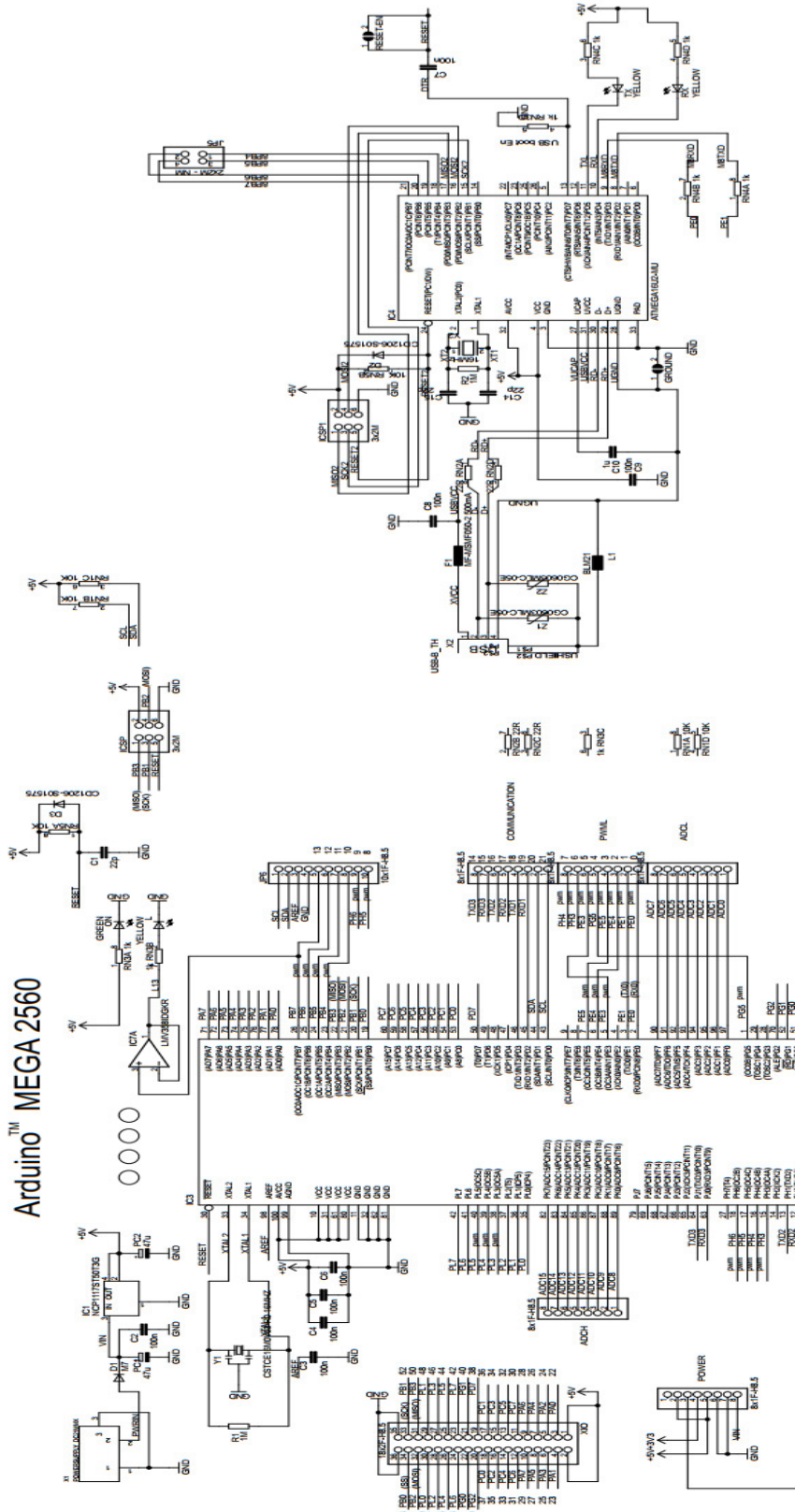
STMicroelectronics. “**Datasheets: Robotics. L298_H_Bridge.**” *Sparkfun*. Disponível em: <https://www.sparkfun.com/datasheets/Robotics/L298_H_Bridge.pdf>. Acesso em: 15 agos, 2017.

Thomsen, Adilson. **Motor DC com Driver ponte H L298N**. Disponível em: <<https://www.filipeflop.com/blog/motor-dc-arduino-ponte-h-l298n/>>. Acesso em: 15 nov. 2017.

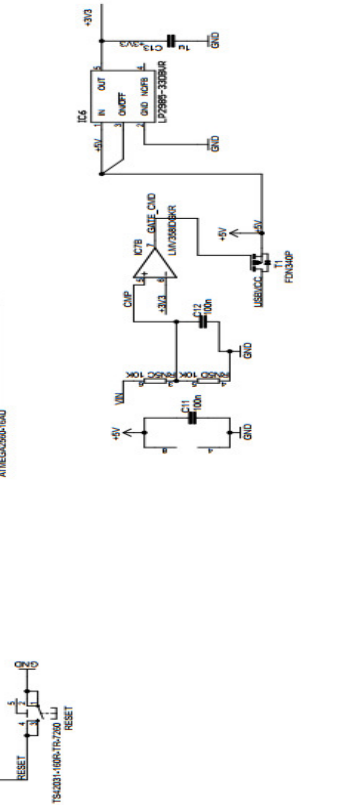
ANEXO A – Desenho Motor 12 VDC.



ANEXO B – Diagrama Arduino Mega 2560



Reference Designs ARE PROVIDED "AS IS" AND "WITH ALL FAULTS." Arduino DISCLAIMS ALL OTHER WARRANTIES, EXPRESS OR IMPLIED, REGARDING PRODUCTS, INCLUDING BUT NOT LIMITED TO ANY IMPLIED WARRANTIES OF MERCHANTABILITY OR FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE. Arduino may make changes to specifications and product descriptions at any time, without notice. The Customer must not rely on the absence or characteristics of any features or instructions marked "reserved" or "undefined." Arduino reserves these for future definition and shall have no responsibility whatsoever for conflicts or incompatibilities arising from future changes to them. The product information on the Web Site or Materials is subject to change without notice. Do not finalize a design with this information. ARDUINO is a registered trademark.



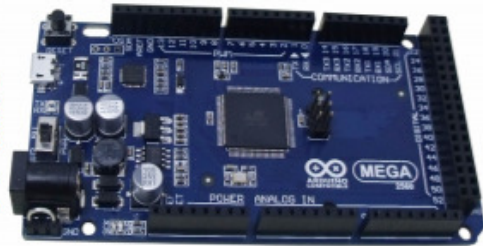
ANEXO C – Datasheet Arduino Mega 2560.

MEGA 2560 R3 Datasheet



■ INTRODUCTION

MEGA 2560 R3 is an Arduino compatible board, It's based on Arduino MEGA 2560 design, So you can use BUONO MEGA 2560 as Arduino MEGA 2560, All Code, shield and IDE for Arduino MEGA 2560 R3 are also valid on BUONO MEGA 2560, Some visible improvement on hardware make BUONO more flexible and easier use, For example: 3.3V or 5V IO selectable allow you connect some 3.3V modules (such as XBee) to BUONO directly.



■ THE DIFFERENCE BETWEEN Arduino MEGA 2560 AND BUONO MEGA 2560

	Arduino MEGA 2560	BUONO MEGA 2560
USB Connector	Type B Female	Micro USB connector
Operating Voltage	5V	3.3V or 5V selectable
3.3V Current	50mA	600mA
5V Current	500mA	1.8A
Input Range	7V to 12V	6V to 23V
MCU	ATMEGA2560	ATMEGA2560
Others		Ground terminal LPF for AVCC

■ FEATURES

- Inherits all of Arduino MEGA 2560's features
- Compatible to Arduino MEGA 2560's pin layout, screw hole and dimensions
- 3.3V or 5V operating voltage selectable
- More visible location of indication LEDs
- Evolved with SMD components
- Digital I/O pins 54(of which 15 provided PWM output)
- Analog Input pins 16
- Flash memory 256 KB or which 8KB used by bootloader
- SRAM 8 KB
- EEPROM 4KB
- Clock speed 16MHz
- Micro USB connection make the cable can be mixed use with most digital products such as cell phone
- 5V DC/DC provide 95% efficiency
- 6V to 23V wide rang input
- Provide max 1.8A for peripheral circuits
- Ground terminal make measurement easier

■ PACKAGE LIST

- 1xBUONO MEGA 2560
- 1xMicro USB cable
- 4xScrew and nut

■ CONTACT US

540 Mill River LN San Jose,
CA95134
E-mail:support@inhaos.com
Web:www.inhaos.com

ANEXO D – Data Sheet Ponte H – L298H.



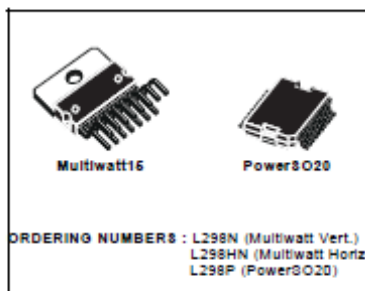
L298

DUAL FULL-BRIDGE DRIVER

- OPERATING SUPPLY VOLTAGE UP TO 46 V
- TOTAL DC CURRENT UP TO 4 A
- LOW SATURATION VOLTAGE
- OVERTEMPERATURE PROTECTION
- LOGICAL "0" INPUT VOLTAGE UP TO 1.5 V (HIGH NOISE IMMUNITY)

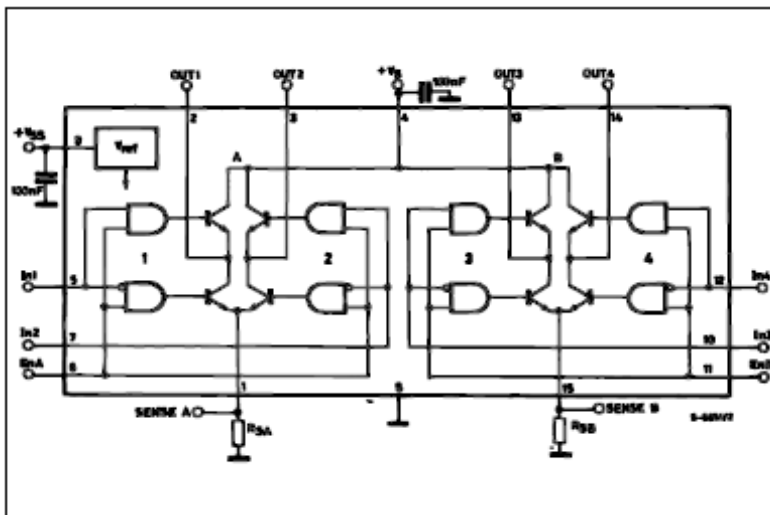
DESCRIPTION

The L298 is an integrated monolithic circuit in a 15-lead Multiwatt and PowerSO20 packages. It is a high voltage, high current dual full-bridge driver designed to accept standard TTL logic levels and drive inductive loads such as relays, solenoids, DC and stepping motors. Two enable inputs are provided to enable or disable the device independently of the input signals. The emitters of the lower transistors of each bridge are connected together and the corresponding external terminal can be used for the con-



nection of an external sensing resistor. An additional supply input is provided so that the logic works at a lower voltage.

BLOCK DIAGRAM



January 2000

1/13