



INSTITUTO FEDERAL
SANTA CATARINA
Campus Joinville

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO,
CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA CATARINA**

**CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM
MECATRÔNICA INDUSTRIAL**

JOINVILLE, DEZEMBRO DE 2015

THOMPSON COSTA HONORATO

PÊNDULO INVERTIDO MICROCONTROLADO

JOINVILLE, 2015

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E
TECNOLOGIA DE SANTA CATARINA
CAMPUS JOINVILLE
DEPARTAMENTO DE TECNOLOGIA
CURSO DE TECNOLOGIA EM MECATRÔNICA INDUSTRIAL**

THOMPSON COSTA HONORATO

PÊNULO INVERTIDO MICROCONTROLADO

**Submetido ao Instituto Federal de
Santa Catarina como parte dos
requisitos para obtenção do título de
Tecnólogo em Mecatrônica Industrial**

**Professor orientador:
Leo Schirmer, MEng.**

JOINVILLE, 2015

Honorato, Thompson.

Pêndulo Invertido Microcontrolado / Honorato, Thompson –
Joinville: Instituto Federal de Santa Catarina, 2015. 46 f.

Trabalho de Conclusão de Curso - Instituto Federal de Santa
Catarina, 2015. Graduação. Curso Superior de Tecnologia em
Mecatrônica Industrial. Modalidade: Presencial.

Orientador: Leo Schirmer, Eng.

1. Ensino 2. Robótica 3. Indústria I. Título

PÊNULO INVERTIDO MICROCONTROLADO

THOMPSON COSTA HONORATO

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do título de
..... e aprovado em sua
forma final pela banca examinadora do Curso
..... do Instituto Federal de Educação,
Ciência e Tecnologia de Santa Catarina.

Joinville, 16 de dezembro de 2015

Banca Examinadora:

Leo Schirmer, MEng.

Roberli Cantidio, Tecn.

José Flavio Dums, MEng.

RESUMO

O trabalho em questão visa a confecção de parte de um robô. Robôs são uma tendência mundial, estão presentes no cotidiano da humanidade e em diversos ramos da indústria. Este último faz uso da tecnologia predominantemente para tarefas repetitivas e que exijam velocidade e elevado grau de precisão, como manipulação, pintura, soldagem, entre outros.

O ramo da robótica, entretanto, não se limita a manipulação. O protótipo construído para o presente projeto, a propósito, objetiva o equilíbrio de um corpo em duas rodas através de aparato eletrônico, sendo conhecido como *Inverted Pendulum Robot* (Robô Pêndulo Invertido), nome dado devido à natureza de sua concepção e comportamento dinâmico.

Os conceitos utilizados para a confecção do dispositivo, porém, não se limitam ao protótipo, que possui dimensional reduzido, podendo ser empregados em modelos maiores. Uma vez que tais tecnologias se tornam cada vez mais presentes, torna-se conveniente o estudo de alternativas aos métodos já empregados em nível de mercado, através de tecnologias acessíveis e menores custos.

Palavras-chave: Robôs, Tecnologia, Equilíbrio, Pêndulo Invertido

ABSTRACT

This work aims for the construction of a robot. Robots are a worldwide tendency, are present on people's daily life and on several areas of the industry. The ladder uses this technology predominantly for repetitive tasks which require speed and a high degree of precision, such as handling, painting, welding, among others.

The area of robotics, however, isn't limited to manipulation tasks. The prototype built for this project, by the way, aims to balance a cart on two wheels through electronic hardware, known as Inverted Pendulum Robot, name given because of its design and dynamics behavior.

The concepts used for making the device, however, are not limited to the prototype itself, which has reduced size, and can be used in larger models. As these technologies become increasingly more evident, it's convenient to study alternatives to the methods already employed in the market, through accessible technologies and at lower costs.

Keywords: Robots, Technology, Equilibrium, Inverted Pendulum

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 01 – Geometria do sistema pêndulo invertido.....	3
Figura 02 – Robô de coordenadas cartesianas	11
Figura 03 – Robô de coordenadas cilíndricas	12
Figura 04 – Robô de coordenadas esféricas.....	12
Figura 05 – Robô SCARA	13
Figura 06 – Robô articulado	13
Figura 07 – Robô paralelo	14
Figura 08 – Segway Personal Transporter (PT)	15
Figura 09 – Filtro passa-baixas ideal	18
Figura 10 – Filtro passa-altas ideal	18
Figura 11 – Filtro passa-faixa ideal	18
Figura 12 – Diagrama de fluxo do filtro FIR	20
Figura 13 – Diagrama de fluxo do filtro IIR	22
Figura 14 – Arduino UNO.....	23
Figura 15 – Motor DC	24
Figura 16 – Ponte H dupla L298N.....	25
Figura 17 – Potenciômetro	26
Figura 18 – Acelerômetro e giroscópio MPU6050	27
Figura 19 – Conversor Buck	28
Figura 20 – Conversor Buck LM2596.....	29
Figura 21 – Roda Ø 68 mm	32
Figura 22 – Protótipo (vista frontal)	33
Figura 23 – Protótipo (vista traseira).....	33
Figura 24 – Esquemático do circuito elétrico	34

Figura 25 – Montagem física do circuito elétrico.....	35
Figura 26 – Fluxograma do algoritmo de controle	38
Figura 27 – Diagrama de tratamento de sinais	39
Figura 28 – Diagrama de controle	39
Figura 29 – Drive Sabertooth 2X25A	46
Figura 30 – Controlador de temperatura	50
Figura 31 – Sistema de controle de nível	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 01 – Custos de unidades de processamento	30
Tabela 02 – Saídas de controle da placa Arduino	36
Tabela 03 – Tabela verdade do driver L298N.....	36
Tabela 04 – Custos do projeto	47

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CLP – Controlador Lógico Programável

I/O – Entrada/Saída

MRO – *Mars Reconnaissance Orbiter* (Orbitador de Reconhecimento de Marte)

SCARA – *Selective Compliance Assembly Robot Arm* (Braço Robótico de Montagem em Conformidade Seletiva)

HT – *Human Transporter* (Transportador de Humanos)

PT – *Personal Transporter* (Transportador Pessoal)

PWM – *Pulse Width Modulation* (Modulação por Largura de Pulso)

DC – *Direct Current* (Corrente Contínua)

DSP – *Digital Signal Processing* (Processamento de Sinal Digital)

FIR – *Finite-duration Impulse Response* (Resposta de Impulso de duração-Finita)

IIR – *Infinite-duration Impulse Response* (Resposta de Impulso de duração-Infinita)

ARMA – *Auto Regressive Moving Average* ([filtro de] Taxa Móvel Auto Regressivo)

USB – *Universal Serial Bus* (Barramento Serial Universal)

RPM – Rotações Por Minuto

LiPo – [bateria de] liga Lítio/Polímero

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Justificativa do projeto	1
1.2 Objetivo geral	2
1.3 Objetivos específicos	2
2 REVISÃO LITERÁRIA	2
2.1 O pêndulo invertido	2
2.1.1 Equações de movimento	3
2.2 Transformada z	5
2.3 Histórico sobre robôs	7
2.4 Componentes de um robô	9
2.4.1 Manipulador mecânico.....	9
2.4.2 Atuadores	9
2.4.3 Sensores	9
2.4.4 Unidade de controle	10
2.4.5 Efetuador.....	10
2.4.6 Unidade de potência.....	10
2.5 Classificação dos robôs	10
2.5.1 Robô de coordenadas cartesianas.....	11
2.5.2 Robô de coordenadas cilíndricas	11
2.5.3 Robô de coordenadas esféricas	12
2.5.4 Robô SCARA	12
2.5.5 Robô articulado	13
2.5.6 Robô paralelo	13
2.5.7 Robô pêndulo invertido.....	14
2.6 Processamento de sinais	15

2.6.1 Modulação PWM	15
2.6.2 Filtragem de sinais	17
2.6.3 Filtros digitais FIR e IIR	18
2.6.3.1 Filtros digitais FIR	19
2.6.3.2 Filtros digitais IIR	20
2.7 Componentes do pêndulo invertido microcontrolado	22
2.7.1 Microcontrolador	22
2.7.1.1 Arduino UNO.....	23
2.7.2 Motor DC	24
2.7.3 Ponte H.....	24
2.7.3.1 Ponte H Dupla L298N	25
2.7.4 Potenciômetro	26
2.7.5 Acelerômetro e giroscópio	26
2.7.5.1 MPU6050	27
2.7.6 Conversor Buck	28
2.7.6.1 Conversor Buck LM2596	28
3 METODOLOGIA	29
3.1 Seleção da unidade de processamento.....	30
3.2 Estrutura básica do protótipo.....	32
3.3 Instalação elétrica	34
3.4 Funcionamento do circuito.....	35
3.5 Sistema de controle	37
3.6 Programa de controle	39
3.7 Equações de controle dos motores.....	43
3.8 Dificuldades encontradas	44
3.8.1 Conjunto motor e caixa redutora.....	44
3.8.2 Bateria	45

3.8.3 Ponte H dupla.....	46
3.9 Custos envolvidos	47
3.10 Resultados obtidos	48
3.11 Possíveis aplicações	49
3.11.1 Controle de temperatura.....	49
3.11.2 Controle de nível.....	50
4 CONCLUSÃO	52
REFERÊNCIAS	53

1 INTRODUÇÃO

Para que seja possível o controle de determinados processos, faz-se necessária a adoção de tecnologias e métodos de controle dos mais diversos, conforme a aplicação em questão.

Em muitas das aplicações encontradas na indústria, lida-se com o constante tratamento das leituras obtidas de um determinado processo através de algoritmos de controle, visando, via de regra, otimizar a tomada de ação. Para tanto, estudos foram realizados nas áreas de eletrônica, programação e teoria de controle, visando lidar com a problemática do equilíbrio dinâmico de um corpo sobre duas rodas.

O trabalho apresentará dados acerca da pesquisa e desenvolvimento de um protótipo, com o objetivo de demonstrar as tecnologias e métodos de controle empregados.

1.1 Justificativa do projeto

Atualmente vários processos industriais lançam mão (e necessitam) de métodos de controle sofisticados para lidar com aplicações das mais diversas, tais como controle de temperatura, volume, umidade, entre outros.

Controladores Lógicos Programáveis (CLP) e controladores dedicados estão entre as tecnologias mais empregadas em processos industriais, estes que por vezes apresentam custo relativamente alto. Tais dispositivos são eficientes, uma vez que são fruto de décadas de desenvolvimento tecnológico, entretanto, é válido o desenvolvimento de técnicas de controle alternativas, também eficazes e mais acessíveis. Uma entre as desvantagens de controladores dedicados remete ao fato de estes serem pouco customizáveis, ou seja, por vezes é necessário adequar a aplicação aos recursos disponíveis no controlador, e não vice-versa. É inegável que o microcontrolador empregado no presente projeto também tenha limitações (assim como todo microcontrolador), contudo, a possibilidade de customizar o código-fonte e os I/Os torna o *hardware* mais versátil.

O projeto foi desenvolvido com base na plataforma Arduino e é aplicável, teoricamente, a quaisquer modelos matemáticos que sigam as mesmas concepções do protótipo, uma vez que o algoritmo de controle visa a correção de um erro previsto.

1.2 Objetivo geral

O trabalho visa projetar e construir um pêndulo invertido sobre duas rodas, também chamado de *Inverted Pendulum Robot* (Robô Pêndulo Invertido), que consiste em um corpo sustentado por um eixo e duas rodas, responsáveis pelo equilíbrio do conjunto.

1.3 Objetivos específicos

O trabalho pretende:

- a) apresentar o diagrama elétrico;
- b) apresentar as características do robô;
- c) relacionar os componentes adotados no projeto;
- d) elaborar e apresentar o código-fonte do projeto;
- e) analisar a viabilidade do projeto quanto ao custo-benefício.

2 REVISÃO LITERÁRIA

Neste capítulo serão abordados aspectos teóricos pertinentes ao presente estudo, de modo a facilitar a compreensão dos conceitos e tecnologias adotados ao longo do desenvolvimento do projeto.

2.1 O pêndulo invertido

Um pêndulo invertido caracteriza-se como um pêndulo que possui seu centro de massa acima de seu ponto de articulação.

Enquanto um pêndulo convencional é estável enquanto suspenso para baixo (articulação localizada acima do centro de massa), um pêndulo invertido possui configuração oposta e é, por concepção, instável, necessitando ser ativamente balanceado para permanecer ereto.

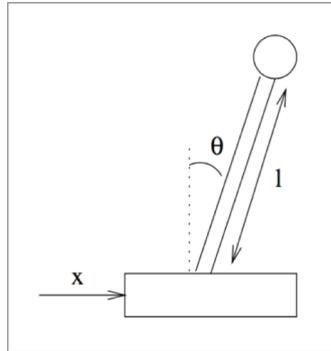


Figura 01 – Geometria do sistema pêndulo invertido

Fonte: LUNDBERG (2002, p.1)

A estabilização do sistema pode ser efetuada de duas maneiras, através da oscilação vertical ou por meio do deslocamento horizontal do ponto de articulação.

A estabilização através de deslocamento horizontal busca a correção do erro gerado pela ação da gravidade compensando tal erro através da movimentação do pêndulo, sendo este o método abordado pelo presente projeto.

O método de estabilização através de oscilação vertical é conhecido como “Pêndulo de Kapitza”, em que a articulação é submetida a uma oscilação vertical e em alta frequência, não sendo necessária a aplicação de um sistema de controle. Tal método é capaz de manter o centro de massa ereto, porém, a oscilação em alta frequência torna este método inadequado a determinadas aplicações.

De acordo com Lundberg, (2002, p.1, tradução nossa) “o sistema de pêndulo invertido é uma demonstração popular da utilização de controle por realimentação para estabilizar um sistema instável de malha fechada.”

2.1.1 Equações de movimento

As equações de movimento de um determinado pêndulo invertido dependem de quais limitações este possui. No caso de um pêndulo com articulação estacionária:

$$\ddot{\theta} - \frac{g}{l} \cos \theta = 0 \quad (2.1)$$

Onde $\ddot{\theta}$ é a aceleração angular do pêndulo, g é a gravidade na superfície do planeta Terra, l é o comprimento do pêndulo e θ é o deslocamento angular medido a partir da posição de equilíbrio.

Isolando $\ddot{\theta}$ obtém-se:

$$\ddot{\theta} = \frac{g}{l} \cos \theta$$

Desta maneira, o pêndulo invertido acelera distanciando-se da posição de equilíbrio, sendo que a aceleração é inversamente proporcional ao comprimento, motivo pelo qual foi optado por uma haste de estabilização de aproximadamente 1 m.

Admite-se que o pêndulo consista em um ponto de massa m , fixo na extremidade de uma haste rígida de massa desprezível de comprimento l , presa a uma articulação oposta ao pêndulo.

O torque do sistema deve ser equivalente ao momento de inércia, multiplicado pela aceleração angular, logo:

$$\tau = I \cdot \ddot{\theta}_g$$

O torque devido a ação da gravidade:

$$\tau = m \cdot g \cdot l \cdot \cos \theta$$

Onde θ é o ângulo medido a partir do ponto de equilíbrio. Efetuando as devidas substituições obtém-se:

$$I \cdot \ddot{\theta}_g = m \cdot g \cdot l \cdot \cos \theta$$

O momento de inércia de um ponto de massa é dado por:

$$I = m \cdot R^2$$

No caso de um pêndulo invertido, o raio R é o comprimento da haste l , neste caso $I = m \cdot l^2$, logo:

$$m \cdot l^2 \cdot \ddot{\theta}_g = m \cdot g \cdot l \cdot \cos \theta$$

Dividindo ambos os lados da equação por $m \cdot l^2$ tem-se:

$$\ddot{\theta}_g = \frac{g}{l} \cos \theta \quad (2.2)$$

Esta equação demonstra a aceleração angular resultante da ação da gravidade, a qual deve ser atenuada pela aceleração proveniente da tração das rodas do robô:

$$\ddot{\theta}_z = -\frac{\ddot{x}}{l} \sin \theta \quad (2.3)$$

Onde $\ddot{\theta}_z$ é a aceleração angular resultante da tração das rodas e \ddot{x} a tração propriamente dita. Para que haja equilíbrio $\ddot{\theta} = \ddot{\theta}_g + \ddot{\theta}_z$, logo:

$$\begin{aligned} \ddot{\theta} &= \frac{g}{l} \cos \theta - \frac{\ddot{x}}{l} \sin \theta \\ -\ddot{x} &= l \cdot \ddot{\theta} - g \cdot \theta \end{aligned}$$

Aplicando a transformada de Laplace obtém-se a função transferência $G(s)$:

$$G(s) = \frac{\Theta(s)}{X(s)} = \frac{-s^2}{l \cdot s^2 - g} = \frac{-s^2/g}{(\tau_L \cdot s + 1)(\tau_L \cdot s - 1)}$$

Onde a constante de tempo τ_L é definida por $\tau_L = \sqrt{l/g}$.

2.2 Transformada z

A transformada z é de suma importância para a análise de sinais digitais, sendo de grande utilidade na aplicação em sinais discretos, tais como aqueles provenientes de uma conversão analógico-digital. Trata-se de uma ferramenta matemática adotada para o desenvolvimento de filtros e sistemas de controle digitais. De acordo com Oppenheim; Willsky (2010, p.442):

[...] para um sistema invariante no tempo, linear, de tempo discreto, com resposta ao impulso $h(n)$, a resposta $y(n)$ do sistema a uma entrada exponencial complexa na forma z^n é $y(n) = H(z)z^n$, em que $H(z) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} h(n)z^{-n}$. Para $z = e^{j\omega}$ com ω real (ou seja, com $|z| = 1$), o somatório da equação [...] corresponde à transformada de Fourier de tempo discreto de $h(n)$. De forma mais geral, quando $|z|$ não está limitado à unidade, o somatório é conhecido como a transformada z de $h(n)$.

A transformada z de um sinal genérico de tempo discreto $x(n)$ é definida como:

$$X(z) \triangleq \sum_{n=-\infty}^{+\infty} x(n)z^{-n} \quad (2.4)$$

Em que z é uma variável complexa. Por conveniência, a transformada z de $x(n)$ às vezes será indicada como $\mathbb{Z}\{x(n)\}$, e a relação entre $x(n)$ e sua transformada z , indicada como:

$$x(n) \stackrel{z}{\leftrightarrow} X(z) \quad (2.5)$$

A transformada z de uma sucessão $\{y_0, y_1, y_2, \dots\}$ é uma função $y_0 + \frac{y_1}{z} + \frac{y_2}{z^2} + \frac{y_3}{z^3} + \dots$, onde z é uma variável real para este caso particular, mas que poderia ter seu domínio estendido aos números complexos. Adotando uma notação mais compacta, pode-se escrever a transformada da sucessão $\{y_n\}$ da seguinte forma:

$$\mathbb{Z}\{y_n\} = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{y_n}{z^n} \quad (2.6)$$

Considerando, a exemplo, a sucessão $\{1, 1, 1, \dots\}$ com todos os termos iguais a 1, isto é, $y_n = 1$, obtém-se:

$$\bar{y}(z) = 1 + \frac{1}{z} + \frac{1}{z^2} + \dots = \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{1}{z}\right)^n$$

Sendo uma série geométrica, se $|1/z| < 1$, a série converge para:

$$\bar{y}(z) = \frac{1}{1 - \frac{1}{z}} = \frac{z}{z - 1}$$

2.3 Histórico sobre robôs

A palavra “robô” deriva da palavra tcheca *robot*, que significa “trabalho forçado”. Já a palavra robótica é ampla no que tange sua definição e possíveis aplicações. Outra definição expressa a robótica como sendo “A ciência ou estudo da tecnologia associada ao projeto, fabricação, teoria e aplicação de robôs” (AMERICAN..., 2015, tradução nossa).

Perguntas tais como “O que é um robô?” ou “Para que serve um robô?” são pertinentes e incitam a reflexão sobre o tema. De maneira geral, robôs são utilizados para auxiliar o ser humano ou até substituí-lo, quaisquer que sejam as tarefas para as quais é projetado. Segundo Romano (2002, p.1):

O conceito de evolução humana está diretamente associado ao grau de desenvolvimento tecnológico adquirido ao longo do tempo, através do aperfeiçoamento desses objetos. Portanto, a motivação de se criarem máquinas que possam substituir o homem na realização de tarefas é uma característica da própria cultura ocidental.

Na década de 1940, o escritor russo Isaac Asimov conceituou o robô como uma máquina desprovida de sentimentos, de aparência humana, cuja conduta é regida conforme sua programação, que por sua vez, deve cumprir regras de ética, conforme as três leis da robótica por ele idealizadas:

1. Um robô não pode ferir um ser humano ou, por omissão, permitir que um ser humano sofra algum mal;
2. Um robô deve obedecer às ordens que lhe sejam dadas por seres humanos, exceto nos casos em que tais ordens contrariem a Primeira Lei;

3. Um robô deve proteger sua própria existência, desde que tal proteção não entre em conflito com a Primeira e a Segunda Leis. (ASIMOV, 2009, p.6)

Embora ainda não existam robôs complexos o suficiente para empregar as leis idealizadas por Asimov em sua totalidade, tais diretrizes servem como norte durante o desenvolvimento de um robô, de modo a não oferecer quaisquer riscos a quem por ventura vir a operá-los, a exemplo de robôs manipuladores industriais.

A robótica é largamente utilizada nos mais diversos ramos da tecnologia. Robôs conhecidos como manipuladores robóticos, porém, são predominantes na indústria e são capazes de realizar diversas tarefas, tais como:

- a) soldagem;
- b) manuseio de peças;
- c) lavagem;
- d) montagem;
- e) rebarbação;
- f) secagem;
- g) parafusamento;
- h) rosqueamento;
- i) furação;
- j) corte.

As aplicações não se limitam às supracitadas, mas estendem-se à criatividade de quem emprega a tecnologia, cada vez mais versátil. Os manipuladores industriais estão presentes no cenário mundial desde a década de 1960, sendo que o primeiro robô industrial, chamado UNIMATE, foi instalado em chão de fábrica pela empresa UNIMATION Inc. Desde então, a adoção da tecnologia no cenário industrial tem aumentado consideravelmente. De acordo com Craig (2006, p.6, tradução nossa):

Uma das principais razões para o aumento do uso de robôs industriais foi a redução de seu custo. [...] durante a década de 1990, houve queda do preço dos robôs, ao passo que houve aumento do custo da mão-de-obra humana. Ademais, os robôs não somente tornaram-se mais baratos, como também mais eficientes: mais rápidos, precisos e flexíveis.

A tecnologia é adotada pela medicina em cirurgias de alto risco, onde sua elevada precisão é imprescindível. É também de suma importância para o ramo científico, como é o caso da exploração do planeta Marte, cuja descoberta de água salinizada ocorreu graças à sonda MRO (*Mars Reconnaissance Orbiter* – Orbitador de Reconhecimento de Marte).

2.4 Componentes de um robô

Dependendo da aplicação à qual um robô é destinado, uma grande variedade de componentes pode estar associada à sua construção, contudo, em linhas gerais, um robô é composto pela integração dos componentes expostos a seguir.

2.4.1 Manipulador mecânico

Se refere às características estruturais e mecânicas de um robô. Consiste da combinação de elementos estruturais rígidos (corpos ou elos) conectados através de articulações (juntas) (RIVIN et al., 1988).

2.4.2 Atuadores

São componentes que convertem energia elétrica, hidráulica ou pneumática em potência mecânica. Através de sistemas de transmissão, a potência mecânica gerada pelos atuadores é enviada aos elos para que os mesmos se movimentem (RIVIN et al., 1988).

2.4.3 Sensores

Sensores fornecem informações à unidade de controle de um robô. De acordo com Romano (2002, p.6).

Fornecem parâmetros sobre o comportamento do manipulador, geralmente em função de posição e velocidade dos elos em função do tempo, e do modo de interação entre o robô e o ambiente operativo (força, torque, sistema de visão) à unidade de controle.

2.4.4 Unidade de controle

Responsável pelo gerenciamento e monitoração dos parâmetros operacionais requeridos para realizar as tarefas do robô. Os comandos de movimentação enviados aos atuadores são originados de controladores de movimento (computador industrial, CLP, placa controladora de passo) e baseados em informações obtidas através de sensores. (RIVIN et al., 1988).

2.4.5 Efetuador

É o elemento de ligação entre o robô e o meio que o cerca. Pode ser tipo garra ou ferramenta. O principal escopo de uma garra é pegar um determinado objeto, transportá-lo a uma posição pré-estabelecida e após alcançar tal posição, soltá-lo. A ferramenta tem como função realizar uma ação ou trabalho sobre uma peça, sem necessariamente manipulá-la (RIVIN et al., 1988).

É importante salientar que nem todo robô é provido de efetuador, como é o caso daqueles voltados à locomoção.

2.4.6 Unidade de potência

Esta unidade é responsável pelo fornecimento de potência necessária à movimentação dos atuadores. A bomba hidráulica, o compressor e a fonte elétrica são as unidades de potência associadas aos atuadores hidráulico, pneumático e eletromagnético, respectivamente (ROMANO, 2002, p.6).

2.5 Classificação dos robôs

Robôs são classificados quanto à estrutura mecânica, sua geração tecnológica e participação do operador humano em seu funcionamento:

- a) robô de coordenadas cartesianas;
- b) robôs de coordenadas cilíndricas;
- c) robô de coordenadas esféricas;
- d) robô SCARA;
- e) robô articulado;
- f) robô paralelo.

O robô desenvolvido para o presente projeto, embora não conste na relação acima, caracteriza-se como um dicitelo, também conhecido como robô pêndulo invertido, e será explanado mais a frente.

2.5.1 Robô de coordenadas cartesianas

Um robô de coordenadas cartesianas possui três juntas prismáticas (PPP), as quais são coincidentes com um sistema de coordenadas de referência cartesiana. O volume de trabalho gerado é retangular, de acordo com a figura 02 (ROMANO, 2002, p.7).

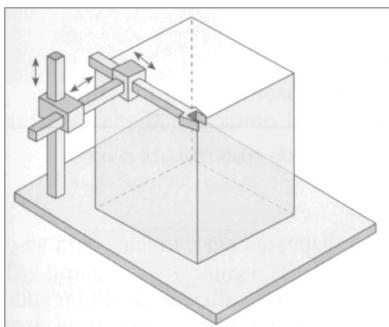


Figura 02 – Robô de coordenadas cartesianas

Fonte: ROMANO, 2002, p.7

2.5.2 Robô de coordenadas cilíndricas

São robôs formados por duas juntas prismáticas e uma rotativa (PPR), compondo movimentos de duas translações e uma rotação. O volume de trabalho gerado é cilíndrico, conforme a figura 03 (ROMANO, 2002, p.7).

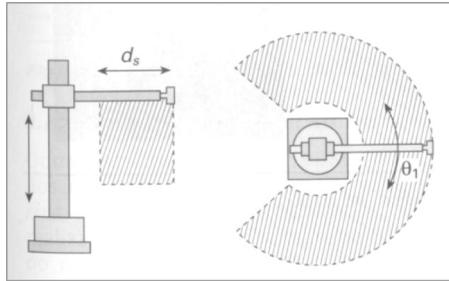


Figura 03 – Robô de coordenadas cilíndricas

Fonte: ROMANO, 2002, p.7

2.5.3 Robô de coordenadas esféricas

São robôs cujos eixos formam um sistema de coordenadas de referência polar, por meio de uma junta prismática e duas de rotação (PRR), constituindo movimentos de uma translação e uma rotação. O volume de trabalho gerado é aproximadamente uma esfera, conforme a figura 04 (ROMANO, 2002, p.8).

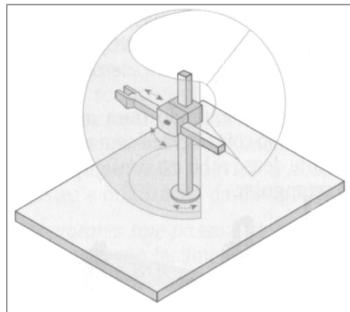


Figura 04 – Robô de coordenadas esféricas

Fonte: ROMANO, 2002, p.8

2.5.4 Robô SCARA

SCARA é o acrônimo de *Selective Compliance Assembly Robot Arm* (Braço Robótico de Montagem em Conformidade Seletiva). Trata-se de um robô que apresenta duas juntas de rotação dispostas paralelamente, de modo a obter o movimento em um plano, e uma junta prismática

perpendicular a esse plano (PRR), apresentando uma translação e duas rotações. O volume de trabalho gerado é aproximadamente cilíndrico, conforme mostra a figura 05 (ROMANO, 2002, p.8).

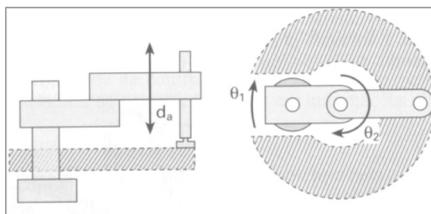


Figura 05 – Robô SCARA

Fonte: ROMANO, 2002, p.8

2.5.5 Robô articulado

O eixo de movimento de sua junta de rotação da base é ortogonal às outras duas juntas de rotação, as quais são simétricas entre si, permitindo maior mobilidade. Seu volume de trabalho apresenta geometria complexa, se comparado às outras concepções de robôs, conforme mostra a figura 06 (ROMANO, 2002, p.8-9).

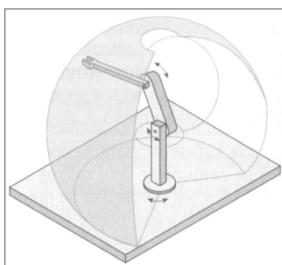


Figura 06 – Robô articulado

Fonte: ROMANO, 2002, p.8-9

2.5.6 Robô paralelo

O robô do paralelo apresenta configuração tipo plataforma e um mecanismo em forma de cadeia cinemática fechada. O volume de trabalho

resultante é aproximadamente esférico (ROMANO, 2002, p.9). A figura 07, a seguir, demonstra este tipo de robô.

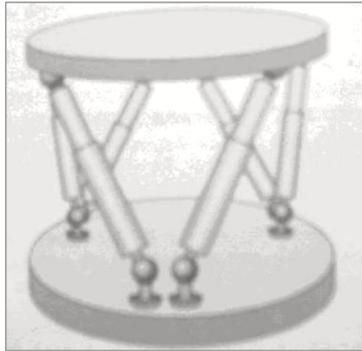


Figura 07 – Robô paralelo

Fonte: ROMANO, 2002, p.9

2.5.7 Robô pêndulo invertido

Esse tipo de robô é o objeto de estudo do presente projeto, diferencia-se das demais concepções já apresentadas, entre outras características, pela ausência de um efetuador e o foco em equilíbrio dinâmico.

Um pêndulo invertido é aquele cujo centro de gravidade é localizado acima de sua articulação. Um pêndulo normal (centro de gravidade localizado abaixo da articulação) é de estabilização relativamente fácil, devido à ação da gravidade. Um pêndulo invertido, porém, é mais instável e deve ser constantemente equilibrado para que permaneça na posição vertical (GONÇALO, 2014).

Embora esse não seja um robô industrial, tal qual os robôs manipuladores, também se faz presente no mercado mundial. A exemplo pode-se citar os veículos Segway. De acordo com o fabricante:

Em meados da década de 1990, a DEKA iniciou o desenvolvimento do Segway Human Transporter (HT), posteriormente alterado para Segway Personal Transporter (PT). O PT é uma plataforma com duas rodas e um guiador, sobre o qual o utilizador está na posição vertical. Utiliza microprocessadores de estado

sólido e giroscópios para equilibrar-se sobre as duas rodas (SEGWAY, 2015).

O Segway Personal Transporter (PT) foi apresentado oficialmente em dezembro de 2001, porém, somente em 2002 foi comercializado e a partir de 2004 passou a ser comercializado internacionalmente. A figura 08 ilustra o veículo Segway Personal Transporter (PT).



Figura 08 – Segway Personal Transporter (PT)

Fonte: GONÇALO, 2014

2.6 Processamento de sinais

A seguir, serão tratados assuntos pertinentes ao controle de sinais. Tal controle é de suma importância ao projeto, o qual lida com leitura de sinais em frequência provenientes do sensor acelerômetro e giroscópio e também realiza controle de sinal de saída para o acionamento dos motores de modo a atender à velocidade desejada.

2.6.1 Modulação PWM

Para atender ao controle de velocidade pretendido para o projeto, foi necessário o estudo de uma alternativa, em nível de *hardware* e *software*, a qual propiciasse o acionamento controlado dos motores. Em vista das tecnologias selecionadas, as quais serão tratadas mais adiante,

foi optado pela técnica de modulação em PWM. De acordo com Ghirardello (2015, p.2).

PWM é a abreviação de *Pulse Width Modulation* (Modulação de Largura de Pulso). [...] Variando-se a largura do pulso e também o intervalo de modo a ter ciclos ativos diferentes, pode-se controlar a potência média aplicada a uma carga. Assim, quando a largura do pulso varia de zero até o máximo, a potência também varia na mesma proporção.

O método utiliza uma onda em forma de pulso retangular, cuja largura é modulada resultando na variação do valor médio da forma de onda. Se considerada uma onda em forma de pulso $f(t)$, com período T , valor mínimo y_{min} , valor máximo $y_{máx}$ e razão cíclica D , o valor médio da forma de onda será dado por:

$$\bar{y} = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt \quad (2.7)$$

De acordo com a equação (2.4), como $f(t)$ é uma onda em forma de pulso, seu valor corresponde a $y_{máx}$ para $0 < t < D * T$ e y_{min} para $D * T < t < T$. A expressão supracitada então torna-se:

$$\begin{aligned} \bar{y} &= \frac{1}{T} \left(\int_0^{DT} y_{máx} dt + \int_{DT}^T y_{min} dt \right) \\ &= \frac{D \cdot T \cdot y_{máx} + T (1 - D) y_{min}}{T} \\ \bar{y} &= D \cdot y_{máx} + (1 - D) y_{min} \end{aligned} \quad (2.8)$$

Esta técnica foi utilizada no projeto com o intuito de regular a tensão entregue ao drive dos motores DC. Ao chavear a tensão de saída de 5 V para o drive com a razão cíclica apropriada, tornou-se possível aproximar a tensão ao nível desejado para controlar a velocidade de rotação de ambos os motores.

2.6.2 Filtragem de sinais

Em determinadas aplicações, é interessante alterar as amplitudes relativas dos componentes em frequência de um sinal digital ou eliminar por completo alguns componentes de frequência, sendo tal processo conhecido como DSP (*Digital Signal Processing* – Processamento de Sinal Digital).

A aplicação de um sensor para realizar a leitura da posição e da aceleração do protótipo em questão traz consigo a necessidade de filtrar as distorções do sinal fornecido. Segundo Oppenheim; Willsky (2010, p.137):

Os sistemas lineares invariantes no tempo, que mudam a forma do espectro, são conhecidos como *filtros conformadores de frequências*. Os sistemas que são projetados para deixar passar algumas frequências essencialmente não distorcidas, e que atenuam significativamente ou eliminam outras, são chamados *filtros seletivos em frequência*.

Embora as aplicações as quais envolvam filtragem seletiva em frequência varie quanto a sua natureza, vários tipos básicos de filtro são comumente utilizados e têm recebido nomes indicativos de sua função. Um filtro passa-baixas caracteriza-se por permitir frequências baixas e atenuar ou rejeitar frequências mais altas, enquanto um filtro passa-altas faz o contrário. Um filtro passa-faixa permite a passagem de uma faixa de frequências e atenua ou rejeita o excedente. Seja qual for a natureza do filtro adotado, as frequências de corte são as que definem os limites entre as frequências que passam e as que são rejeitadas, ou seja, as frequências na banda de passagem e na banda rejeição. As figuras 09, 10 e 11 apresentam cada um dos filtros citados.

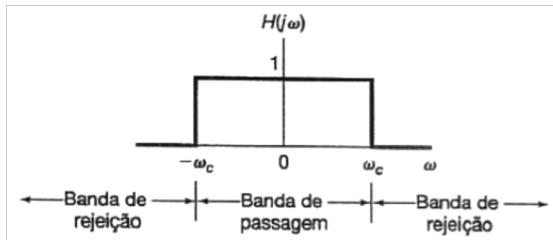


Figura 09 – Filtro passa-baixas ideal

Fonte: (OPPENHEIM; WILLSKY, 2010, p.141)

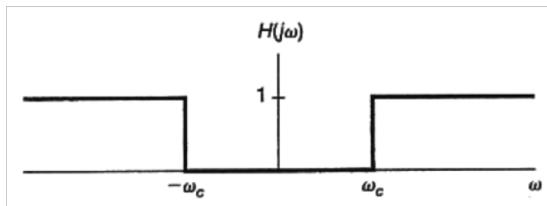


Figura 10 – Filtro passa-altas ideal

Fonte: (OPPENHEIM; WILLSKY, 2010, p.142)

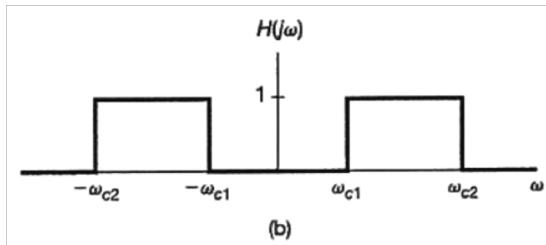


Figura 11 – Filtro passa-faixa ideal

Fonte: (OPPENHEIM; WILLSKY, 2010, p.142)

2.6.3 Filtros digitais FIR e IIR

Há dois tipos de filtros digitais lineares invariantes no tempo, chamados FIR (*Finite-duration Impulse Response* – Resposta de Impulso de duração-Finita) e IIR (*Infinite-duration Impulse Response* – Resposta

de Impulso de duração-Infinita). A seguir, serão estudados de maneira sucinta ambos os métodos de filtragem de sinal.

2.6.3.1 Filtros digitais FIR

Filtros digitais FIR possuem características que os tornam convenientes em várias aplicações:

- a) permitem obter uma resposta de frequência de fase exatamente linear;
- b) não podem ser instáveis;
- c) métodos de dimensionamento são geralmente lineares;
- d) podem ser implementados com eficiência em *hardware* de uso geral ou específico.

[...] o filtro de Resposta de Impulso de duração-Finita (FIR) também é chamado não-recursivo ou filtro de convolução. Do ponto de vista do domínio do tempo, é também chamado de filtro de taxa-móvel. [...] (BURRUS, 2012, p.65, tradução nossa).

A duração ou comprimento da sequência de resposta dos impulsos desse tipo de filtro é, por definição, finita, portanto, sua saída pode ser expressa através da seguinte função:

$$y(n) = \sum_{k=0}^{N-1} h(k) x(n-k) \quad (2.9)$$

Onde n e k são inteiros, $x(n)$ é a sequência de entrada, $y(n)$ é a sequência de saída e $h(k)$ é o comprimento N da resposta do impulso. Em termos práticos, essa técnica retorna como saída a média das entradas passadas, motivo pelo qual esta abordagem é conhecida como *moving-average* (taxa-móvel).

A função transferência de um filtro FIR é dada pela transformada- z de $h(n)$:

$$H(z) = \sum_{n=0}^{N-1} h(n) z^{-n} \quad (2.10)$$

A resposta em frequência é dada $z = e^{j\omega}$, logo:

$$H(\omega) = \sum_{n=0}^{N-1} h(n) e^{-j\omega n} \quad (2.11)$$

Onde ω é a frequência em radianos por segundo e $\omega = 2\pi f$, sendo f a frequência em Hz. A figura 12 abaixo ilustra o diagrama de fluxo de um filtro FIR:

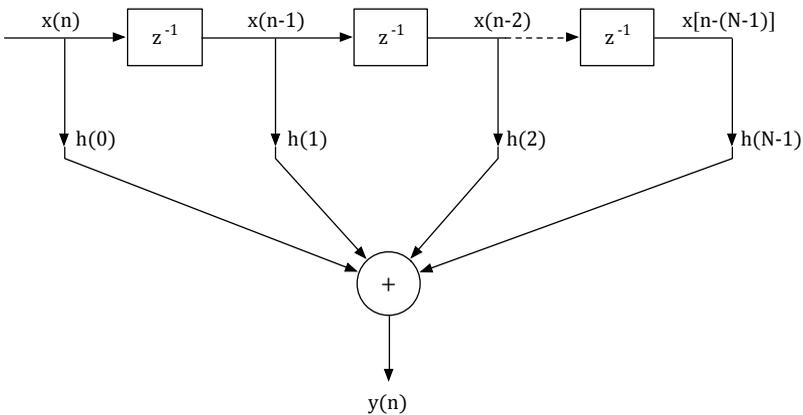


Figura 12 – Diagrama de fluxo do filtro FIR

Fonte: autor (2015)

2.6.3.2 Filtros digitais IIR

Filtros IIR, assim como os FIR, possuem características que favorecem sua adoção:

- saída atual depende da entrada atual, das N entradas anteriores e das M saídas anteriores (filtro recursivo de ordem M);
- não possui resposta de duração finita;
- possui realimentação da saída, embora possa ser instável;
- quanto às faixas de frequência, pode ser muito mais seletivo se comparado ao filtro FIR, considerando a mesma complexidade computacional);
- pode ser calculado a partir de dois filtros FIR.

Filtros digitais IIR, diferentemente dos filtros FIR, caracterizam-se por utilizar *feedback* (realimentação). De acordo com Burrus (2012, p.183, tradução nossa):

[...] o filtro de Resposta de Impulso de duração-Infinita (IIR) também é chamado de filtro recursivo ou, por vezes, um filtro de taxa-móvel auto regressivo (ARMA [*AutoRegressive Moving-Average*]). Em contraste com o filtro FIR, que possui uma função transferência polinomial, o filtro IIR possui uma função transferência racional.

A relação entre as variáveis de entrada e saída para um filtro IIR é dada por:

$$y(n) = \sum_{k=1}^N a(k) y(n-k) + \sum_{m=0}^M b(m) x(n-m) \quad (2.12)$$

Onde a segunda adição é exatamente a mesma taxa-móvel do presente somada a M valores do passado da entrada. A diferença se dá pela primeira adição, que é uma soma ponderada dos valores de saída N anteriores. Este é o *feedback* ou parte recursiva, que faz com que a resposta para um impulso de entrada teoricamente dure para sempre.

A saída de um filtro IIR pode ser calculada por convolução:

$$y(n) = \sum_{k=0}^{\infty} h(k) x(n-k) \quad (2.13)$$

A função transferência de um filtro IIR, tal qual um filtro FIR, é dada pela transformada-z:

$$H(z) = \sum_{n=0}^{\infty} h(n) z^{-n} \quad (2.14)$$

Esta função transferência é também a razão das transformadas-z dos termos $a(n)$ e $b(n)$:

$$H(z) = \frac{\sum_{n=0}^M b(n) z^{-n}}{\sum_{n=0}^N a(n) z^{-n}} = \frac{B(z)}{A(z)} \quad (2.15)$$

A resposta em frequência é dada por $z = e^{j\omega}$, logo:

$$H(\omega) = \sum_{n=0}^{\infty} h(n) e^{-j\omega n} \quad (2.16)$$

A figura 13, a seguir, apresenta o diagrama de fluxo de um filtro IIR.

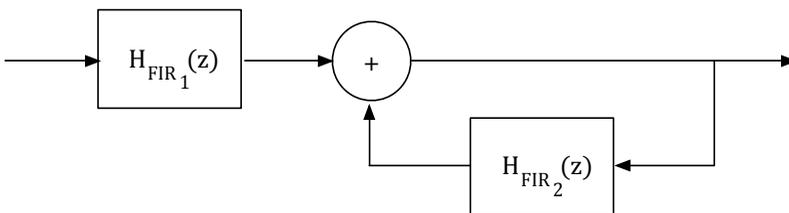


Figura 13 – Diagrama de fluxo do filtro IIR

Fonte: autor (2015)

2.7 Componentes do pêndulo invertido microcontrolado

A seguir serão referidos os componentes utilizados durante o desenvolvimento do projeto.

2.7.1 Microcontrolador

Para realizar a estabilização do dispositivo, é necessária a leitura dos dados de posição e aceleração deste para posterior processamento, através de um algoritmo de controle. Para tanto é necessário adotar um dispositivo capaz de tais tarefas.

Portanto, para o presente projeto foi adotado o microcontrolador Arduino UNO, levando-se em conta fatores como custo, praticidade e disponibilidade de mercado.

2.7.1.1 Arduino UNO

Trata-se de uma plataforma que, dentre outras vantagens, destaca-se por dispensar a utilização de uma placa específica para a gravação do código, já que a comunicação com o microcontrolador contido na placa é realizada através de porta USB (*Universal Serial Bus*), sendo que o *software*, denominado Arduino IDE, é gratuito. De acordo com o fabricante da plataforma:

Arduino é uma plataforma eletrônica *open-source*, baseada em *hardware* e *software* fáceis de usar. É destinada a qualquer pessoa que esteja desenvolvendo projetos interativos (ARDUINO, 2015, tradução nossa).

Para o projeto, foi adotada a placa Arduino UNO, sendo este o modelo do fabricante em maior evidência, cuja capacidade de processamento atende ao projeto. Conforme o fabricante:

Arduino/Genuino UNO é a melhor placa para iniciar o desenvolvimento em eletrônica e programação. Se esta é a sua primeira experiência com o Arduino, o UNO é a placa mais robusta para iniciar. O UNO é a placa mais utilizada e documentada de toda a família Arduino (ARDUINO, 2015, tradução nossa).



Figura 14 – Arduino UNO

Fonte: ARDUINO, 2015

2.7.2 Motor DC

Para que seja possível rotacionar as rodas de um robô, é necessária a utilização de um dispositivo que possibilite converter energia elétrica em mecânica. Para tanto foram utilizados dois motores DC (*Direct Current* – Corrente Contínua), sendo um para cada roda.

Motores elétricos são conversores eletromagnéticos que transformam energia elétrica em energia mecânica, através do princípio do eletromagnetismo. Os motores elétricos são divididos em corrente alternada (AC) e corrente contínua (DC) (OLIVEIRA, 2011, p.2 *apud* MOTORES..., 2011).



Figura 15 – Motor DC

Fonte: OLIVEIRA, 2011, p.2

2.7.3 Ponte H

Para manter-se equilibrado, o protótipo necessita que as duas rodas rotacionem nos sentidos horário e anti-horário, sendo também necessário o controle de velocidade de cada uma das rodas. Para atender a esta exigência foi utilizada uma “Ponte H”, a qual permite a inversão do sentido da corrente elétrica e, conseqüentemente para este caso, a inversão do sentido de rotação das rodas, além do controle de velocidade através de modulação PWM (*Pulse Width Modulation* – Modulação de Largura de Pulso). De acordo com Williams (2002, p.344, tradução nossa):

Uma ponte H é um circuito eletrônico o qual permite que uma tensão seja aplicada através de uma carga em qualquer direção. Estes circuitos são frequentemente utilizados em robótica e outras aplicações para permitir que motores de corrente contínua rotacionem em ambos os sentidos.

2.7.3.1 Ponte H Dupla L298N

Para atender às exigências do projeto, foi optado por uma placa eletrônica específica para estes fins, baseada no chip L298N, o qual é capaz de controlar cargas indutivas como relés, motores DC e motores de passo. Ainda é possível controlar independentemente a velocidade de rotação de dois motores DC ou um motor de passo (DRIVER..., 2015). Seguem abaixo imagem e maiores informações a respeito do componente:

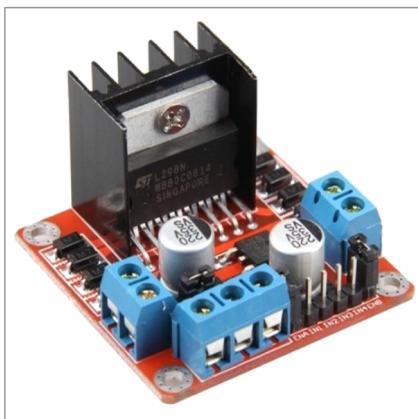


Figura 16 – Ponte H dupla L298N

Fonte: DRIVER..., 2015

- a) tensão de operação: 4~35 V;
- b) chip: ST L298N;
- c) corrente de operação máxima: 2 A por canal ou 4 A máximo;
- d) tensão de comando: 5 V;
- e) corrente de comando: 0~36 mA;
- f) limites de temperatura: -20 a +135 °C;
- g) potência máxima: 25 W;
- h) dimensões: 43 x 43 x 27 mm;
- i) peso: 30 g.

2.7.4 Potenciômetro

De acordo com o dicionário *The Authoritative Dictionary of IEEE Standards Terms*:

Um potenciômetro [...] é um componente eletrônico que possui resistência variável ajustável. Geralmente, é um resistor de três terminais onde a conexão central é deslizante e manipulável. **Se todos os três terminais são usados, ele atua como um divisor de tensão** (THE AUTHORITATIVE..., 2015, tradução nossa, grifo nosso).

Uma vez que o microcontrolador necessita ler dados de posição provenientes de um sensor e realiza também o ajuste de ganho da potência dos motores, foram empregados dois potenciômetros, sendo o primeiro responsável pelo ajuste fino da leitura da posição do robô em graus e o outro pelo ajuste de ganho proporcional dos motores.

Cada um dos potenciômetros foi ligado como um divisor de tensão, de modo a fornecer a cada uma das entradas analógicas do microcontrolador uma tensão de controle de 0 a 5 Vcc. Segue abaixo imagem de um potenciômetro:



Figura 17 – Potenciômetro

Fonte: REIS, 2015

2.7.5 Acelerômetro e giroscópio

Para que seja possível equilibrar o robô, primeiramente faz-se necessária a aquisição dos dados de posição e aceleração do dispositivo.

Para tanto, foi adotado um sensor do tipo acelerômetro e giroscópio. Um acelerômetro é definido como um “instrumento para medir a aceleração de um veículo ou corpo em movimento.” (DICIONÁRIO..., 2015). Já o giroscópio consiste em “[...] um dispositivo usado para indicar as mudanças de direção de um objeto em movimento.” (ENCICLOPÉDIA..., 2015).

2.7.5.1 MPU6050

Para atender aos requisitos no que se refere à leitura dos dados de posição e aceleração do protótipo, foi optado pela placa MPU6050. A figura 18 ilustra a placa:

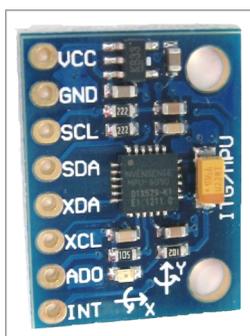


Figura 18 – Acelerômetro e giroscópio MPU6050

Fonte: MPU-6050..., 2015

De acordo com o fabricante da plataforma Arduino, segue descrição do sensor MPU6050:

O [sensor] MPU6050 possui um acelerômetro MEMS e um giroscópio MEMS em um único chip. É muito preciso, pois possui um conversor analógico-digital de 16 bits por canal. Por este motivo, o mesmo capta os canais x, y e z ao mesmo tempo. O sensor utiliza o barramento I2C para fazer interface com o Arduino. O MPU-6050 não é caro, especialmente pelo fato de que este combina um acelerômetro e um giroscópio (MPU-6050..., 2015, tradução nossa).

2.7.6 Conversor Buck

O conversor *step-down* (abaixador de tensão) do tipo Buck é adotado em aplicações as quais necessitem uma tensão inferior à fornecida pela fonte, tendo como característica rendimento superior aos métodos não chaveados, por haver dissipação consideravelmente menor. De acordo com Erickson (2001, p.32, tradução nossa):

O conversor buck caracteriza-se por possuir controle linear. Ademais, a tensão de saída é menor ou igual a tensão de entrada, uma vez que $0 \leq D \leq 1$. Sistemas de realimentação são frequentemente construídos para ajustar a razão cíclica D de modo a regular a tensão de saída do conversor.

A figura 18 a seguir ilustra um modelo de conversor Buck com um filtro passa-baixa, de modo a remover os harmônicos provenientes do chaveamento do interruptor.

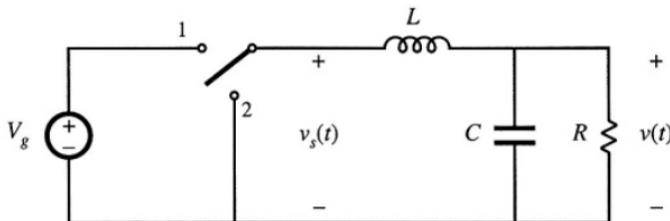


Figura 19 – Conversor Buck

Fonte: ERICKSON, 2001, p.31

A adoção de um conversor Buck partiu da necessidade de adequar a tensão da bateria (11,1 V) à tensão recomendada para alimentar a placa Arduino. Apesar da placa suportar 12 V de alimentação, recomenda-se 7,5 V devido a possibilidade de aquecimento e possível queima do regulador de entrada da placa.

2.7.6.1 Conversor Buck LM2596

Tendo em mente o baixo consumo de corrente de uma placa Arduino, foi adotada uma placa com o circuito integrado LM2596 (figura 20), capaz de suprir uma corrente de saída nominal de 2 A.



Figura 20 – Conversor Buck LM2596

Fonte: REGULAD..., 2015

Seguem abaixo as especificações do conversor:

- a) tensão de entrada: 3,2 a 40 V;
- b) tensão de saída: 1,5 a 35 V,
 - saída ajustável, entrada 1,5 V maior que a saída;
- c) corrente de saída: 2 A corrente nominal, 3 A máxima;
- d) eficiência de conversão: 92%;
- e) frequência de comutação: até 150 kHz;
- f) temperatura de operação: -40 a 85 °C.

3 METODOLOGIA

Em vista da necessidade de realizar o controle dinâmico de um pêndulo invertido, sendo este de natureza instável devido à ação da gravidade, foi realizada, a princípio, uma pesquisa qualitativa acerca das possíveis tecnologias a serem empregadas quanto ao processamento das informações. Diversas alternativas foram identificadas, dentre as quais pode-se destacar:

- a) Raspberry Pi;
- b) PIC;
- c) BeagleBone Black;
- d) Arduino.

3.1 Seleção da unidade de processamento

Cada uma das opções supracitadas oferece vantagens e desvantagens em vista das demais, portanto, diversos fatores foram relevantes ao selecionar a tecnologia, tais como:

- a) custo;
- b) disponibilidade de mercado;
- c) entradas e saídas digitais e analógicas;
- d) interface com o computador;
- e) praticidade;
- f) documentação existente.

Quanto a custo e disponibilidade de mercado, observou-se significativa disparidade entre as opções. Custos aproximados podem ser vistos na tabela 01:

Produto	Preço médio (R\$)
PIC16F877a	35,00
Raspberry Pi 2	270,00
BeagleBone Black	370,00
Arduino UNO	50,00

Tabela 01 – Custos de unidades de processamento

Fonte: MERCADO..., 2015

O microcontrolador PIC16F877a mostrou-se o mais viável, seguido da placa Arduino UNO, entretanto, as placas Raspberry Pi 2 e BeagleBone Black apresentaram custos consideravelmente superiores. Quanto à disponibilidade, há oferta de todas as tecnologias no mercado nacional, havendo, portanto, a possibilidade de adquirir qualquer uma das soluções.

No tocante a entradas e saídas digitais, todas as unidades de processamento disponibilizam portas suficientes para o desenvolvimento do projeto, porém, as placas Raspberry Pi 2 e BeagleBone Black apresentam cada qual seu inconveniente no tocante a entradas e saídas analógicas.

- a) Raspberry Pi 2,

- não possui entradas e saídas analógicas nativas, necessitando a utilização de uma placa de expansão;
- b) BeagleBone Black,
 - possui entradas analógicas nativas, porém, suporta tensão máxima de 1,8 V;
 - possui saída analógica PWM.

No que diz respeito à interface com um computador, sendo esta imprescindível para programar a unidade de processamento, as placas Arduino UNO, Raspberry Pi 2 e BeagleBone Black permitem conectividade diretamente através da porta USB por meio de um cabo USB compatível, além de não necessitarem de hardware adicional para funcionar, bastando conectar a uma fonte de alimentação compatível. Já o PIC16F877a necessita de um gravador, o qual pode ser confeccionado ou adquirido. Ainda a respeito do PIC16F877a, este necessita de hardware adicional para funcionar, já que trata-se de um microcontrolador e não de uma placa, como é o caso das demais alternativas.

No tocante à documentação existente, todas as alternativas disponibilizam material de suporte abrangente, portanto, nenhum impedimento quanto a este quesito independente da tecnologia selecionada.

Após análise das vantagens e desvantagens inerentes a cada uma das tecnologias previamente mencionadas, foi optado pela plataforma Arduino. Abaixo seguem fatores que motivaram a adoção deste hardware:

- a) custo acessível,
 - é ligeiramente mais dispendioso que o microcontrolador PIC16F877a, porém, não necessita de *hardware* adicional para funcionar;
- b) possui todas as entradas e saídas necessárias,
 - dispõe de todas as entradas e saídas digitais e analógicas necessárias ao desenvolvimento do projeto, não sendo necessária a aquisição e instalação de uma expansão;
- c) interface com o computador através de porta USB e *software* de programação gratuito;
- d) Vasta documentação e exemplos práticos disponíveis para consulta;
- e) Diversas bibliotecas disponíveis para *download*;
- f) Linguagem de programação relativamente mais simples que as demais opções.

3.2 Estrutura básica do protótipo

Além dos componentes citados anteriormente, foi necessária a utilização dos itens listados a seguir:

- a) conjunto roda e caixa redutora (duas peças),
 - responsável pela locomoção do protótipo;
- b) placa em acrílico,
 - estrutura utilizada para a fixação de todos os componentes;
- c) haste,
 - fabricada em alumínio com comprimento de aproximadamente 1 m, para a estabilização do conjunto;
- d) bateria,
 - responsável pelo fornecimento de energia elétrica a todos os componentes.

A figura 21 ilustra a roda adotada no robô.



Figura 21 – Roda Ø 68 mm
Fonte: MERCADO LIVRE, 2015

De posse de todos os componentes necessários, foi realizada a montagem mecânica e a instalação elétrica dos componentes. As figuras 22 e 23 apresentam o protótipo já montado.



Figura 22 – Protótipo (vista frontal)
Fonte: autor (2015)



Figura 23 – Protótipo (vista traseira)
Fonte: autor (2015)

3.3 Instalação elétrica

Serão apresentados os diagramas elétricos do protótipo, bem como informações importantes acerca de cada um dos componentes. A figura 24 expressa o esquemático do circuito elétrico confeccionado.

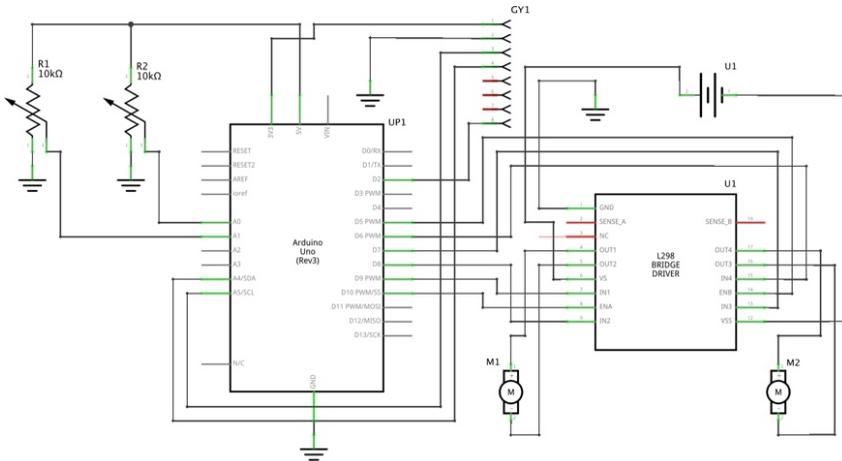


Figura 24 – Esquemático do circuito elétrico
Fonte: autor (2015)

Seguem elucidações acerca do circuito supramencionado:

- a) potenciômetro R1,
 - conectado à entrada A1, responsável pelo ajuste de ganho do acionamento dos motores;
- b) potenciômetro R2,
 - conectado à entrada A0, responsável pela correção da leitura de posição angular do sensor;
- c) fonte DC U1,
 - bateria de 11,1 V utilizada para alimentação de todo o *hardware*;
- d) sensor GY1,
 - sensor acelerômetro e giroscópio, responsável pela leitura dos dados de posição angular e aceleração do robô.

Adicionalmente, a figura 25 a seguir representa as ligações elétricas fisicamente, para uma mais clara compreensão do circuito.

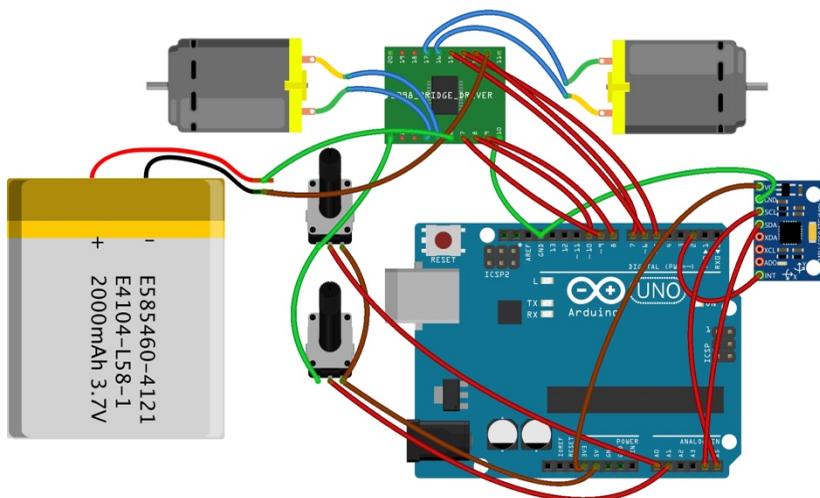


Figura 25 – Montagem física do circuito elétrico

Fonte: autor (2015)

A respeito da imagem acima e do esquemático anterior, foram desconsideradas as conexões entre a bateria de 11,1 V e o conversor Buck e deste com o conector de alimentação da placa Arduino.

3.4 Funcionamento do circuito

Sendo a placa Arduino UNO a unidade de processamento do robô, dependem desta placa, direta e indiretamente, todos os movimentos realizados pelo robô. A este *hardware* estão conectados elementos de entrada e saída de dados, conforme segue:

- a) elementos de entrada de dados,
 - sensor acelerômetro e giroscópio;
 - potenciômetros;
- b) elementos de saída de dados,
 - driver dos motores;
 - motores DC.

Após alimentado o circuito, dados de posição angular e aceleração são obtidos pelo sensor, os quais são transmitidos para a placa Arduino através das entradas analógicas A4 e A5. O microcontrolador, à vista disso, processa as informações e comanda o driver dos motores DC por meio de saídas digitais e analógicas, conforme descreve a tabela 02:

Saída	Característica	Entrada do driver	Função
5	Analógica	EnB	Controle de velocidade PWM
6	Digital	IN4	Acionamento e sentido de rotação
7	Digital	IN3	Acionamento e sentido de rotação
8	Digital	IN2	Acionamento e sentido de rotação
9	Digital	IN1	Acionamento e sentido de rotação
10	Analógica	EnA	Controle de velocidade PWM

Tabela 02 – Saídas de controle da placa Arduino

Fonte: autor (2015)

O driver dos motores, por sua vez, funciona conforme descreve a tabela 03:

En	IN1	IN2	Status	Sentido
0	LOW	LOW	Desligado	-
		HIGH	Desligado	-
	HIGH	LOW	Desligado	-
		HIGH	Desligado	-
0 > 5 V	LOW	LOW	Desligado	-
		HIGH	Ligado	Avante
	HIGH	LOW	Ligado	Reverso
		HIGH	-	-

Tabela 03 – Tabela verdade do driver L298N

Fonte: autor (2015)

Referente à tabela anterior, esta é aplicável aos canais de saída A e B, disponíveis no driver. As entradas EnA e EnB são responsáveis pela velocidade de rotação dos motores, sendo estas receptoras das saídas de controle PWM da unidade de processamento, cuja tensão varia entre 0 e 5 V. As entradas IN1 e IN2 controlam o acionamento e o sentido de rotação do canal A, enquanto as entradas IN3 e IN4 controlam o canal B.

As nomenclaturas *LOW* e *HIGH* remetem à linguagem de programação da plataforma Arduino, em que *LOW* significa “nível baixo” ou “desligado” e *HIGH* significa “nível alto” ou “ligado”.

Os dois potenciômetros adotados no circuito possuem funções similares, porém, lidam com variáveis distintas do programa. Ambos funcionam como um divisor de tensão, enviando um sinal de 0 a 5 V às entradas analógicas A0 e A1. O potenciômetro R1 atua no ajuste de ganho dos motores, aumentando ou diminuindo a taxa de aceleração em função da posição angular do protótipo, já o potenciômetro R2 gera um *offset* da leitura de posição angular.

3.5 Sistema de controle

Para que seja possível o equilíbrio do robô, é necessário adotar um algoritmo de controle, de modo a ler e tratar os dados obtidos através dos sensores e acionar os motores conforme necessário. Para tanto, uma resultante negativa é criada com base na diferença entre o ângulo de inclinação desejado (0°) e o valor atual lido pelo giroscópio. Desta maneira, uma diferença entre ambos acarreta em uma tensão de controle aplicada aos drives dos motores simultaneamente, proporcional à discrepância, corrigindo a diferença e, conseqüentemente, mantendo o robô equilibrado.

A abordagem adotada é conhecida como *state feedback* (realimentação de estado) e possui vantagens consideráveis, se comparada ao controle *On-Off* (Liga-Desliga). Isto porque uma vez que o motor é acionado sempre em carga plena, sua velocidade de rotação tende a manter-se a mesma, independente do ângulo de inclinação, o que gera um erro consideravelmente maior. Ao aplicar nos motores uma tensão diretamente proporcional à inclinação tal erro é atenuado, pois a velocidade dos motores torna-se menor à medida em que a diferença entre o ângulo desejado e o ângulo atual também é menor, tornando o sistema mais estável.

As figuras 26, 27 e 28 a seguir ilustram o fluxograma de funcionamento do algoritmo de controle, o diagrama de tratamento de sinais e o diagrama de controle.

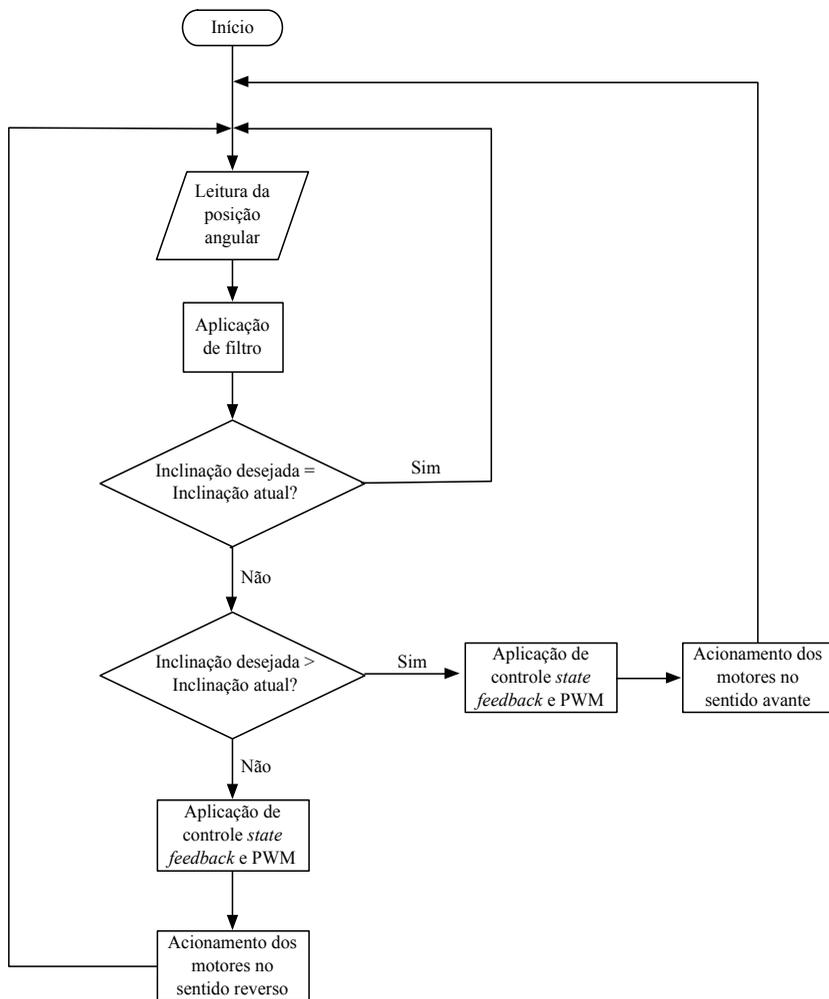


Figura 26 – Fluxograma do algoritmo de controle

Fonte: autor (2015)

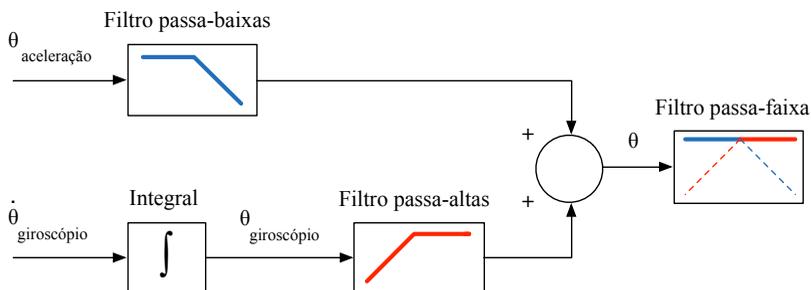


Figura 27 – Diagrama de tratamento de sinais

Fonte: autor (2015)

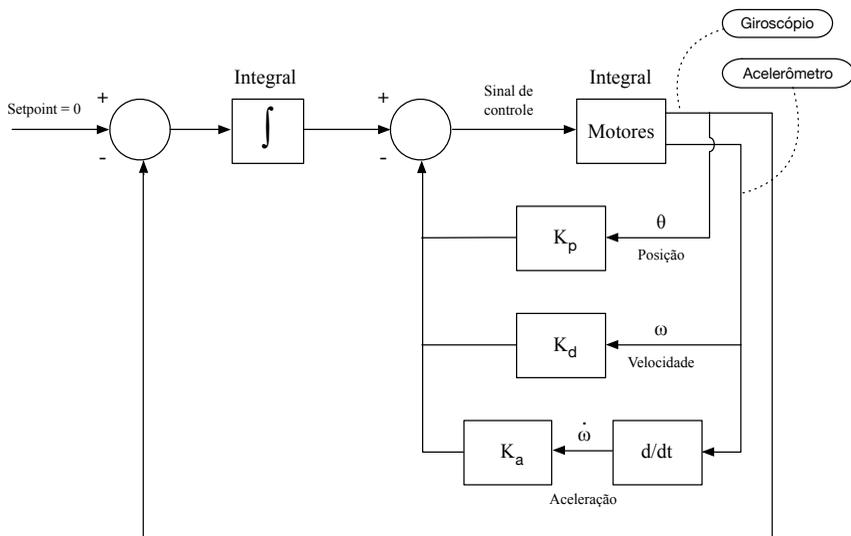


Figura 28 – Diagrama de controle

Fonte: autor (2015)

3.6 Programa de controle

O programa, chamado de *sketch* na plataforma Arduino, foi desenvolvido com base em pesquisas realizadas em projetos similares e bibliotecas *open-source* (código-fonte aberto). O *sketch* foi desenvolvido por meio do aplicativo Arduino IDE, o qual foi desenvolvido pela mesma

empresa responsável pela plataforma Arduino. A seguir seguem as bibliotecas adotadas no projeto:

- a) I2Cdevlib.h,
 - utilizada para a comunicação entre a placa Arduino e o sensor acelerômetro e giroscópio;
- b) MPU6050_6Axis_MotionApps20.h,
 - destinada à leitura e tratamento dos dados provenientes do sensor acelerômetro e giroscópio.

A seguir serão expostos os principais segmentos do código.
Declaração das bibliotecas utilizadas:

```
#include "I2Cdev.h"
#include <SoftwareSerial.h>
#include "MPU6050_6Axis_MotionApps20.h"
#include "Wire.h"
```

Potenciômetros de ajuste angular e ganho dos motores:

```
// ganho é determinado pelo potenciômetro conectado à entrada A0
// (conversor A/D)
static int potGanho = A0;

// potenciômetro de offset conectado à entrada A1 (conversor A/D)
static int potOffset = A1;
```

Variáveis de ganho:

```
// ganho proporcional, variáveis são utilizadas na rotina de atualização do
// controle PWM

float Kp = 15;
// ganho integral
float Ki = 0.5;
// ganho derivativo
float Kd = 12;
// ganho de aceleração
float Ka = 10;
```

Filtro:

// filtro de primeira ordem, adotado para atenuar o ruído de alta frequência

```
float fcorte = 14;
float tau = 1/(2*3.14*fcorte);
float gnum = (1-(2*tau/dt));
float gden = (1+(2*tau/dt));
float filt_par = gnum/gden;
float filt_gain = 1/gden;
float filt = 0;
float filt_p = 0;
float filt_out = 0;

float fcorteg = fcorte;
float taug = 1/(2*3.14*fcorteg);
float gnumg = (1-(2*taug/dt));
float gdeng = (1+(2*taug/dt));
float filt_parg = gnumg/gdeng;
float filt_gaing = 1/gdeng;
float filtg = 0;
float filtgp = 0;
float filt_outg = 0;
```

Configuração de I/Os:

```
// motor 1
pinMode(10, OUTPUT);
pinMode(9, OUTPUT);
pinMode(8, OUTPUT);

// motor 2
pinMode(7, OUTPUT);
pinMode(6, OUTPUT);
pinMode(5, OUTPUT);
pinMode(12, OUTPUT);
////////////////////////////////////

// potenciômetros de ganho e offset
pinMode(potGanho, INPUT);
```

```
pinMode(potOffset, INPUT);
```

Controle dos motores:

```
float Drive_Motor(float torque) {
if (torque >= 0) { // motores para frente
    digitalWrite(IN4, LOW);
    digitalWrite(IN3, HIGH);
    digitalWrite(IN2, LOW);
    digitalWrite(IN1, HIGH);
} else { // motores para trás
    digitalWrite(IN4, HIGH);
    digitalWrite(IN3, LOW);
    digitalWrite(IN2, HIGH);
    digitalWrite(IN1, LOW);
    torque = abs(torque);
}

analogWrite(EnB,torque);
analogWrite(EnA,torque);
}
```

Rotina de controle de velocidade

```
float updateSpeed() {

error=setpoint-filtg;

integrated_errorp = integrated_error;
integrated_error = constrain(integrated_errorp + Ki*error,-64,64);
control_out = K*0.04*(integrated_error -(Kp*filtg + Kd*angular_rate
+Ka*filt_out));

//limitação de velocidade
return constrain(control_out, -125,125);
```

A variável torque é obtida através da rotina acima, esta função retorna o valor calculado pela variável control_out, o qual é chamado ao final de cada *looping* do programa da seguinte maneira:

Drive_Motor(updateSpeed());

3.7 Equações de controle dos motores

O acionamento dos motores foi controlado por meio de um conjunto de equações, as quais, através de variáveis de controle, permitiram determinar o sentido de rotação e a potência entregue aos motores. A seguir serão elucidadas, de maneira sucinta, as equações que permitiram tal controle.

O algoritmo de controle necessita, em primeiro momento, do erro atual do sistema, obtido através da leitura do sensor de posição e da aplicação de filtros:

$$\theta_e = SP - \theta_f \quad (3.1)$$

Onde θ_e é o erro do sistema, ou seja, a diferença entre o *setpoint* SP (0° , visando manter o protótipo na vertical) e a posição angular atual já filtrada θ_f . A seguir é determinado o erro integral E_f :

$$E_f = E_{f\ a} + K_i \cdot \theta_e \quad (3.2)$$

Em que K_i é o ganho integral e $E_{f\ a}$ o erro integral da iteração anterior. Finalmente, a saída é determinada através da seguinte equação:

$$Q = K \cdot \frac{1}{25} \cdot [E_f - (K_p \cdot \theta_f + K_d \cdot i_\theta + K_a \cdot A_f)] \quad (3.3)$$

Onde:

Q : saída;

K : ganho geral do sistema, obtido através da leitura do potenciômetro conectado à entrada analógica A0;

E_f : erro integral;

K_p : ganho proporcional;

θ_f : posição angular;

K_d : ganho derivativo;

i_θ : taxa angular;

K_a : aceleração;

A_f : leitura de aceleração proveniente do acelerômetro, já filtrada.

É importante salientar que as variáveis K_p , K_i , K_d e K_a , presentes nas equações (3.2) e (3.3) são constantes determinadas previamente no *software*. O valor de Q , que varia entre -255 e 255, é enviado para a saída PWM da placa Arduino, cujo sinal é interpretado pelo drive dos motores. Ainda a respeito de Q , se este apresentar valor inferior a 0, as saídas digitais configuram o drive para que o mesmo movimente as rodas para frente, se o valor for superior a 0, ocorre a inversão do sentido de rotação das rodas. O controle de sentido de rotação das rodas do pêndulo, aliado ao controle de velocidade, são responsáveis pelo equilíbrio de todo o conjunto.

3.8 Dificuldades encontradas

A concepção final do robô foi resultado de várias iterações e testes funcionais, divergindo de sua concepção inicial. A seguir, serão descritas algumas das características que sofreram alterações significativas.

3.8.1 Conjunto motor e caixa redutora

A princípio, imaginou-se que o conjunto de roda e caixa redutora incluso na estrutura doada pelo instituto seria o suficiente para responder aos estímulos do driver e manter o conjunto em equilíbrio. Testes práticos demonstraram que a resposta dos componentes não era suficiente para satisfazer a demanda.

O problema foi resolvido ao adquirir um motor de maior performance, com rotação e torque maiores. Análises práticas permitem afirmar que o novo *hardware* apresentou características significativamente superiores. Seguem abaixo dados do motor, que também inclui caixa redutora:

- a) referência: AK280/0.63PF05R330SC;
- b) fabricante: Akiyama;
- c) tensão,
 - operação: 3 a 12 V;
 - nominal: 5 V;
- d) rotação,

- sem carga: 330 RPM;
- máximo rendimento: 280 RPM;
- e) corrente,
 - sem carga: 300 mA;
 - máximo rendimento: 1,44 A;
- f) torque: 0,63 kgf.cm;
- g) potência: 1,8 W.

A seguir dados do conjunto anterior:

- a) referência: DG01D-A130GEARMOTOR;
- b) fabricante: DAGU Hi-Tech Electronic;
- c) tensão recomendada: 4,5 V;
- d) rotação (sem carga): 100 RPM;
- e) corrente (sem carga): 190 mA (máximo 250 mA);
- f) torque máximo: 800 gf.cm.

Esta alteração, contudo, fez necessário prolongar a estrutura, uma vez que os motores originais são dispostos verticalmente, enquanto os novos motores necessitaram montagem axial. A solução encontrada foi providenciar uma placa em policarbonato com as dimensões suficientes para a montagem e anexado a mesma à estrutura original através de cola epóxi. Foi também necessária a aquisição de abraçadeiras metálicas para fixar os motores à estrutura.

3.8.2 Bateria

Testes preliminares foram realizados com uma bateria recarregável de 9 V/220 mAh (bateria de 9 V convencional). Tais testes foram frustrados, pois após curto período de acionamento a estrutura demonstrava incapacidade de suprir o drive dos motores com potência o suficiente para gerar o torque e velocidade necessários, casos em que as rodas paravam e o robô caía devido à exaustão da bateria.

Foi então adquirida uma bateria do tipo LiPo (liga lítio/polímero) de 11,1 V/2200 mAh com característica de descarga rápida. Testes revelaram que a bateria se mostrou adequada ao projeto, mas também gerou dois inconvenientes, seu peso e sua tensão de saída. A respeito do peso, inicialmente a bateria foi fixada próximo ao eixo e sua força peso causou o deslocamento do centro de massa do robô, causando

instabilidade durante o funcionamento, impossibilitando manter a estrutura próximo a 0° e, por conseguinte, causando a queda do protótipo.

A solução encontrada foi fixar a bateria na haste de estabilização, em uma posição tal a coincidir o centro de massa de todo o conjunto com a orientação em 0° , aproximadamente. Após testes a robô foi então capaz de manter o equilíbrio.

Ainda a respeito da bateria, o fato de adotar uma nova alternativa com tensão 2,1 V maior fez necessária a utilização de um conversor *step-down* (tipo Buck), de modo a regular a tensão de alimentação da placa Arduino em 7,5 V. Tal adaptação se fez necessária devido ao risco de alimentar a placa com tensões próximas a 12 V, sob risco de sobreaquecer seu regulador de entrada e inutilizar o *hardware*.

3.8.3 Ponte H dupla

O drive L298N adotado no projeto mostrou-se eficiente, entretanto, ocorreu a queima de duas peças durante as etapas de desenvolvimento devido a picos de corrente, já que o mesmo suporta uma corrente máxima de 4 A.

Neste caso em específico, houve a necessidade de permanecer com a mesma especificação, muito embora não fosse a mais adequada. Isto porque a solução encontrada apresentou custo inviável para o projeto. A figura a seguir ilustra o *hardware* que teoricamente solucionaria o problema:

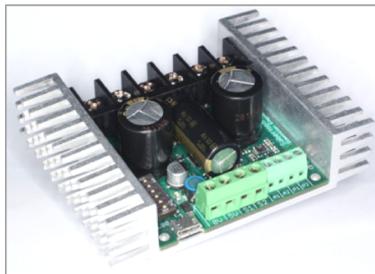


Figura 29 – Drive Sabertooth 2X25A

Fonte: ROBOT..., 2015

Informações básicas:

- a) tensão de entrada: 6 a 24 V nominal, 30 V máximo;

- b) corrente de saída: 25 A nominal por canal, 50 A de pico;
- c) dimensões: 65 x 80 x 20 mm;
- d) peso: 96 g.

Tal qual o drive L298N, o modelo Sabertooth 2X25A suporta controle PWM e o acionamento de dois motores simultaneamente. Além disso, a placa conta com proteção contra sobrecorrente e sobreaquecimento, prevenindo contra queima, recursos que o drive L298N não possui. O fator proibitivo para a adoção desta placa foi seu custo, de aproximadamente R\$560,00. Tendo em vista a diferença expressiva de custo (o drive L298N custa aproximadamente R\$16,00), foi vantajoso adquirir placas sobressalentes e reduzir o ganho dos motores de modo a evitar picos de corrente. Para evitar a queima de drives adicionais, foi implementada uma limitação de velocidade via *software*.

3.9 Custos envolvidos

A construção do protótipo envolveu a utilização de diversas tecnologias. A maioria dos componentes, contudo, necessitou ser adquirida no mercado. A tabela 05, a seguir, apresenta a relação dos principais componentes, juntamente com seu custo de aquisição.

Componente	Quantidade	Preço unitário (R\$)	Subtotal (R\$)
Arduino UNO	1	41,90	41,90
Kit de cabos	2	15,00	30,00
MPU6050	1	16,90	16,90
Ponte H L298N	1	16,00	16,00
Motor 330 RPM	2	45,00	90,00
Bateria 11,1 V	1	99,00	99,00
Carregador	1	65,00	65,00
Conversor LM2596	1	10,00	10,00
Potenciômetro 10 k Ω	2	2,50	5,00
Interruptor 2 posições	1	5,00	5,00
Placa acrílica	1	20,00	20,00
Cola Araldite	2	16,00	32,00
Total (R\$)		430,80	

Tabela 04 – Custos do projeto

Fonte: autor (2015)

Não foram contabilizados itens como abraçadeiras, parafusos, arruelas e afins devido ao baixo custo relativo. Foram fornecidos pelo Instituto Federal de Santa Catarina a estrutura de fixação e as rodas, motivo pelo qual também não foram incluídos.

3.10 Resultados obtidos

Após o término da construção do robô e posteriores testes funcionais, foi observado que o mesmo mostrou-se capaz de equilibrar-se. Notou-se, contudo, que a atual concepção do mesmo não permite que o mesmo o faça sem que haja determinada oscilação.

Ainda a respeito do equilíbrio do protótipo, através da instalação de um potenciômetro para ajuste de ganho foi possível ajustar em tempo real a aceleração dos motores em função do ângulo de inclinação, tornando a mesma mais abrupta ou menos acentuada. Tal ajuste permitiu verificar que há uma relação direta entre o ganho, a estabilidade e o deslocamento necessário.

Um baixo valor de ganho necessita de um grande deslocamento e proporciona baixa instabilidade ao passo que um elevado ganho necessita de curto deslocamento, pois tende a corrigir o erro mais rapidamente, entretanto, tende a ser mais instável e suscetível a queda do conjunto. A resposta para esta balança foi a busca de um meio-termo para o valor de ganho, proporcionando níveis de oscilação e instabilidade admissíveis.

Com relação a possíveis melhorias para projetos futuros, propõe-se a adoção de um drive o qual suporte maior corrente, como o já citado Sabertooth 2X25 ou similar, de modo a evitar eventual queima. Ainda a respeito do *hardware*, sugere-se estudar a possibilidade de placas Arduino mais compactas e de baterias mais leves. Do ponto de vista do *software*, recomenda-se experimentar métodos alternativos, como o controle PID, para efeito de comparação. Foi identificada uma folga de aproximadamente 10° no eixo de cada motor, característica esta que contribuiu para a instabilidade do conjunto, sendo assim, a utilização de um motor com folga consideravelmente menor tornaria o protótipo mais estável.

Por fim, independentemente dos aperfeiçoamentos necessários e sugeridos constata-se que o presente projeto atendeu às expectativas e, por conseguinte, conclui-se que o projeto obteve êxito, atingindo aos objetivos propostos inicialmente.

3.11 Possíveis aplicações

Muito embora o sistema de controle do presente projeto tenha sido desenvolvido para o equilíbrio do mesmo, tais princípios são passíveis de serem aplicados em diversas aplicações, desde que realizadas as devidas adequações em *hardware* e *software*.

3.11.1 Controle de temperatura

É comum a necessidade de controlar a temperatura de um determinado processo. Em residências este controle é realizado constantemente por condicionadores de ar, refrigeradores e até saudeicheiras. Na indústria métodos de controle variados são utilizados para controlar a temperatura de um dado material ou substância, como metal líquido, óleo, água e placas eletrônicas.

Em se tratando de aplicações industriais, a grande maioria se dá através de um controle chamado *On-Off* (Liga-Desliga), cujo funcionamento ocorre através do fornecimento de *feedback* negativo em função de um *setpoint* (ponto de ajuste) pré-estabelecido, ou seja, em uma aplicação de aquecimento o sistema de calefação é acionado após a temperatura tornar-se inferior ao valor mínimo permitido, sendo comumente aplicado um parâmetro de histerese para evitar comutações sucessivas ao atingir o *setpoint*. Ainda a respeito deste método de controle, o acionamento da carga é invariavelmente pleno, isto é, não é possível controlar a intensidade com a qual serão acionadas as resistências, estas estarão hora ligadas, hora desligadas.

Tais aplicações caracterizam-se por permitir um grande erro, resultante de um sistema de controle *On-Off* em detrimento do comportamento discreto da saída (ligada ou desligada). Entretanto, para aplicações as quais necessitem de um controle mais apurado, torna-se viável a aplicação do sistema de controle desenvolvido, uma vez que o mesmo seria capaz de, através das leituras de temperatura, atenuar consideravelmente o erro gerado em função das inércias de aquecimento e resfriamento, análogas à oscilação [balanço] do robô. A figura 30 ilustra um controlador de temperatura convencional.



Figura 30 – Controlador de temperatura

Fonte: COEL, 2015

3.11.2 Controle de nível

Seja no controle de nível de uma caixa d'água, do reservatório de água de uma cervejaria ou do nível de óleo de um tanque, é prática comum o controle de nível de um dado reservatório na indústria, quaisquer que sejam os fluidos envolvidos. De maneira similar ao controle de temperatura, o controle de nível pode também ser realizado através de controle *On-Off*, porém, tal controle sofre das mesmas deficiências descritas no item anterior.

Através da aplicação de uma válvula proporcional e de um sensor analógico de nível é possível adotar o método de controle projetado, uma vez que o nível do tanque, apesar de não oscilar constantemente como a orientação angular do robô, sofrerá alterações provenientes da demanda do processo.

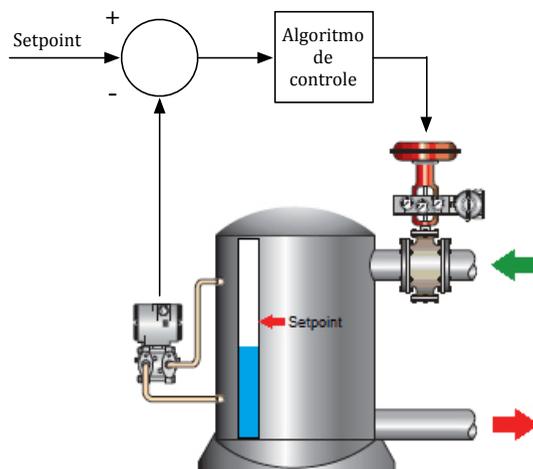


Figura 31 – Sistema de controle de nível
Fonte: CONTROLE..., 2015

4 CONCLUSÃO

As práticas de análise, pesquisa e desenvolvimento tornam explícito que a elaboração de métodos de controle é possível não somente em nível industrial, uma vez elucidados todos os aspectos inerentes à aplicação em questão.

O presente projeto será de grande valia, uma vez adotados os métodos para propósitos os quais possuam as mesmas características, havendo grande possibilidade de melhoria em nível de *hardware* e *software*, sendo possível a adoção de técnicas de controles alternativas, que por ventura entreguem maior eficácia e estabilidade.

Constata-se que todos os objetivos propostos obtiveram êxito e as dificuldades foram superadas, conforme referido no item Resultados obtidos. Os conhecimentos obtidos nas áreas envolvidas foram de inestimável valia para a elaboração de projetos futuros os quais adotem aparato similar.

REFERÊNCIAS

_____. **American Heritage Dictionary**. Disponível em:
<https://ahdictionary.com/word/search.html?q=robotics&submit.x=39&submit.y=32>. Acesso em: 30 set. 2015.

ROMANO, Vitor Ferreira. **Robótica industrial**: Aplicação na indústria de manufatura e de processos. 1. ed. São Paulo: Editora Edgard Blücher LTDA, 2002, p.1-9.

ASIMOV, Isaac: **Eu, robô**. 2. ed. Rio de Janeiro: Editora Ediouro – Singular, 2009.

CRAIG, John: **Robótica**. 1. ed. São Paulo: Editora Pearson, 2006.

RIVIN, E.: **Mechanical Design of Robots**. 1. ed. Nova York: Editora McGraw-Hill Inc., 1988.

GONÇALO, Glayberthon. **Pêndulo Invertido e Controle de Equilíbrio**. Disponível em:
<http://arenarobo.com.br/pendulo-invertido-e-controle-de-equilibrio>.
Acesso em: 2 out. 2015.

GHIRARDELLO, Ariovaldo. **Apostila sobre Modulação PWM**. Mato Grosso: Politec, 2015. 6 p.

OPPENHEIM, Alan V.; WILLSKY, Alan S.. **Sinais e Sistemas**. 2. ed. São Paulo: Editora Pearson, 2010. 520 p.

BURRUS, Sidney. **Digital Signal Processing and Digital Filter Design**. 1. ed. Texas: Editora Connexions, 2012. 313 p.

_____, **What is Arduino**. Disponível em:
<https://www.arduino.cc>. Acesso em: 2 out. 2015.

_____, **Arduino/Genuino UNO**. Disponível em:
<https://www.arduino.cc>. Acesso em: 5 out. 2015.

_____, **Getting Started With Arduino on Windows**. Disponível em: <https://www.arduino.cc/en/Guide/Windows>. Acesso em: 7 out. 2015.

OLIVEIRA, Paulo Roberto de. **Modelagem e Simulação de um Controlador PID Analógico e de Motor DC para Ajuste de Velocidade**. 2011. 9 f.. Dissertação (Engenharia de Controle e Automação) – Faculdade Anhanguera Educacional, São Paulo.

_____, **Motores de Corrente Contínua - Guia Rápido Para uma Especificação Precisa**. Disponível em: http://www.siemens.com.br/medias/FILES/2910_2006050514_1908.pdf. Acesso em: 15 nov. 2011.

WILLIAMS, Al. **Microcontroller projects using the Basic Stamp**. 2. ed. Kansas: CMP Books, 2002.

_____, **Drive Motor Ponte H L298N**. Disponível em: <http://www.filipeflop.com/pd-6b80a-driver-motor-ponte-h-l298n.html>. Acesso em: 7 out. 2015.

The Authoritative Dictionary of IEEE Standards Terms. 7 ed. Nova Jérsei: IEEE Press, 2000.

REIS, Mauro dos. **Potenciômetro**. Disponível em: <http://baudaeletronica.blogspot.com.br/2011/09/potenciometro.html>. Acesso em: 7 out. 2015.

_____, **Dicionário de Português Online**. Disponível em: <http://michaelis.uol.com.br/moderno/portugues/index.php?lingua=portugues-portugues&palavra=aceler%F4metro>. Acesso em: 7 out. 2015.

_____, **Enciclopédia Escolar Britannica**. Disponível em: <http://escola.britannica.com.br/article/481438/giroscópio>. Acesso em: 7 out. 2015.

_____, **MPU-6050 Accelerometer + Gyro**. Disponível em: <http://playground.arduino.cc/Main/MPU-6050>. Acesso em: 7 out. 2015.

ERICKSON, Robert W. **Fundamentals of Power Electronics**. 2. ed. Colorado: Kluwer Academic Publishers, 2001.

_____. **Regulador de Tensão LM2596 Conversor DC-DC Step Down**. Disponível em:

<http://www.filipeflop.com/pd-e6749-regulador-de-tensao-lm2596-conversor-dc-dc-step-down.html>. Acesso em: 24 out. 2015.

_____. Mercado Livre. Disponível em:

<http://www.mercadolivre.com.br>. Acesso em: 8 out. 2015.

_____. Mercado Livre. Disponível em:

http://produto.mercadolivre.com.br/MLB-702569919-roda-amarela-68mm-para-chassi-rob-arduinorobotica-_JM. Acesso em 13 out. 2015.

_____. RoboCore. **Sabertooth 2X25**. Disponível em:

https://www.robocore.net/modules.php?name=GR_LojaVirtual&prod=382. Acesso em 13 nov. 2015.

_____. COEL. **HWKT**. Disponível em:

<http://coel.getshop.cc/produtos/temporizadores/eletronicos-digitais-microprocessados>. Acesso em 16 nov. 2015.

_____. Embarcados. **Controle PID em sistemas embarcados**.

Disponível em: <http://www.embarcados.com.br/controle-pid-em-sistemas-embarcados>. Acesso em 16 nov. 2015.