

**CENTRO PAULA SOUZA**  
**FATEC SANTO ANDRÉ**  
**Tecnologia em Mecatrônica Industrial**

**DIREÇÃO SERVO CONTROLADA PARA VEÍCULO AUTÔNOMO  
COM CONTROLADOR DIGITAL**

**Francisco Ivan Nunes Mesquita**

**Santo André**

**2018**

**Francisco Ivan Nunes Mesquita**

**DIREÇÃO SERVO CONTROLADA PARA VEÍCULO AUTÔNOMO  
COM CONTROLADOR DIGITAL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado  
Faculdade de Tecnologia de Santo André como  
requisito parcial para obtenção do título de  
Tecnólogo em Mecatrônica Industrial.

Orientador: Prof. Dr. Edson Caoru Kitani

**Santo André**

**2018**

## FICHA CATALOGRÁFICA

M582d

Mesquita Francisco Ivan Nunes

Direção servo controlada para veículo autônomo com controlador digital / Francisco Ivan Nunes Mesquita. - Santo André, 2018. – 47f: il.

Trabalho de Conclusão de Curso – FATEC Santo André.  
Curso de Tecnologia em Mecatrônica Industrial, 2018.

Orientador: Prof. Dr. Edson Caoru Kitani

1. Mecatrônica. 2. Direção. 3. Servo-assistida. 4. Veículo autônomo. 5. PID. 6. Controlador digital. I. Direção servo controlada para veículo autônomo com controlador digital.

629.8

**LISTA DE PRESENÇA**

Santo André, 10 de Julho de 2018

**LISTA DE PRESENÇA REFERENTE À APRESENTAÇÃO DO  
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO COM O TEMA: "DIREÇÃO  
SERVO CONTROLADA PARA VEÍCULO AUTÔNOMO COM  
CONTROLADOR DIGITAL" DO ALUNO DO 6º SEMESTRE DESTA U.E.**

**BANCA**

**PRESIDENTE:**  
PROF. EDSON CAORU KITANI



**MEMBROS:**  
PROF. FABIO DELATORE



PROF. FERNANDO GARUP DALBO

**ALUNO:**

FRANCISCO IVAN NUNES MESQUITA



## **AGRADECIMENTOS**

A esposa e filha pelo apoio e compreensão de minha ausência.

## RESUMO

Atualmente os veículos autônomos já são uma realidade, e com os avanços da tecnologia estes veículos tornam-se um grande objeto de pesquisa e desenvolvimento os mesmos são compostos por diversos subsistemas como por exemplo: visão, navegação, aceleração e direção, sistemas estes que são implementados usando diversos os conceitos de controle, como por exemplo a direção que requer uma malha fechada e bom mecanismo de esterçamento. Com isto em mente este trabalho apresenta o projeto de uma direção (volante) servo-controlada para um veículo autônomo, ou seja, um sistema de controle de posição. Este sistema foi elaborado em 4 partes: sistema mecânico que conta com uma adaptação para ser atuada por um motor, a parte do atuador que se trata de um motor cc com redução, driver de potência e o processamento que roda em um microcontrolador PIC, onde através da realimentação e referência ambos por potenciômetro, calcula-se o erro e utiliza-se um algoritmo PID para controlar o ângulo das rodas dianteiras.

**Palavras chave:** Direção, servo-assistida, PID, Controle.

## **ABSTRACT**

Currently autonomous vehicles are already a reality, and with the advances of technology these vehicles become a great object of research and development, they are composed of several systems for example: vision, navigation, acceleration and direction, these systems are implemented using various control concepts, such as the direction that requires a closed loop and a good mechanism. Thinking this the work presents the design of a steering wheel in closed-loop for an autonomous vehicle, that is, a position control system. This system was developed in 4 parts: a mechanical system that has been adapted to be actuated by a motor, the part of the actuator that is a DC motor with reduction, power board and processing that runs in a PIC microcontroller, where through feedback and reference by potentiometers, the error is calculated and a PID algorithm is used to control the angle of the front wheels.

**Keywords:** Steering wheel, Servo-controlled, PID, Control.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Veículo elétrico.....	16
Figura 2 - Sistema de direção .....	18
Figura 3 - Graus de liberdade de um veículo .....	19
Figura 4 - Controle lateral.....	20
Figura 5 - Diagrama em blocos malha fechada.....	21
Figura 6 - Diagrama em blocos de malha aberta .....	21
Figura 7 - Direção do CADU.....	22
Figura 8 - Sinal amostrado .....	23
Figura 9 - Conversão de sinal .....	27
Figura 10 - Conversão digital para analógico.....	27
Figura 11 - Motor cc estator rotor .....	28
Figura 12 - Princípio de funcionamento do motor cc .....	29
Figura 13 - Exemplo de uso do PWM.....	30
Figura 14 – Sistema mecânico .....	31
Figura 15 - Driver de potência .....	32
Figura 16 - Circuito do motor.....	33
Figura 17 - Diagrama do programa principal.....	35
Figura 18 - Diagrama em blocos do sistema.....	36
Figura 19 - Gráfico resposta a pulso de 500ms.....	38
Figura 20 - Curva de teste $K_P=50$ .....	39

## LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 – Sinal discretizado.....	23
Equação 2 – PID tempo contínuo.....	24
Equação 3 – Relação proporcional em tempo discreto.....	24
Equação 4 – Integral em tempo discreto.....	25
Equação 5 – Derivada em tempo .....	25
Equação 6 – PID em tempo discreto.....	25
Equação 7 – Resolução de um conversor A/D .....	27
Equação 8 – Função de transferência genérica.....	39

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

DARPA	Defense Advanced Research Projects Agency
PID	Proporcional Integral Derivativo
PIC	Programmable Interface Controller
CC	Corrente Contínua
CA	Corrente Alternada
PWM	Pulse Width Modulation
ADAS	Advanced Driver Assistance systems
ABS	Anti-lock Braking System
UFMG	Universidade Federal de Minas Gerais
USP	Universidade de São Paulo
EEPROM	Electrically-Erasable Programmable Read-Only Memory
LCD	Liquid Crystal Display
LED	Light Emitting Diode
USB	Universal Serial Bus

## LISTA DE SÍMBOLOS

V	Volts
A	Amperes
%	Porcentagem
$\mu\text{H}$	Microhenry
$\Omega$	Ohm
Hz	Hertz
W	Watt
ms	Milisse segundos

## SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS .....	5
RESUMO.....	6
ABSTRACT .....	7
LISTA DE FIGURAS .....	8
LISTA DE EQUAÇÕES .....	9
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS .....	10
LISTA DE SÍMBOLOS.....	11
SUMÁRIO.....	12
1 INTRODUÇÃO.....	14
1.1 Motivação.....	15
1.2 Metas e resultados esperados .....	15
1.3 Objetivos do trabalho .....	16
1.4 Organização do texto .....	16
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....	17
2.1 Histórico .....	17
2.2 Sistema de direção.....	18
2.3 Automatização de veículos .....	19
2.3.1 Direção servo controlada.....	20
2.4 Controle digital .....	22
2.4.1 Controladores PID .....	23
2.4.2 Microcontrolador .....	26
2.5 Motores de corrente continua.....	28
2.5.1 Controle de velocidade de motores CC .....	29
2.5.2 Servo motor .....	30
3 DESENVOLVIMENTO .....	31
3.1 Conjunto mecânico.....	31

3.2	Hardware.....	31
3.2.1	Driver de potência.....	32
3.2.2	Motor .....	32
3.2.3	Realimentação.....	33
3.2.4	Placa do microcontrolador .....	33
3.3	Software.....	34
4	TESTES e ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	37
4.1	Métodos de segurança por software .....	37
4.2	Curva do sistema .....	37
4.3	Ajuste de ganho .....	38
5	CONCLUSÃO.....	41
5.1	Resultados .....	41
5.2	Propostas futuras .....	41
6	REFERÊNCIAS .....	43
	APÊNDICE A - CIRCUITO GERAL .....	45
	APÊNDICE B - CÓDIGO SIMPLIFICADO.....	46
	ANEXO A - CIRCUITO DRIVER DE POTÊNCIA .....	48

## 1 INTRODUÇÃO

Atualmente, os sistemas de transporte inteligentes tem sido uma área de grande pesquisa e desenvolvimento, o que proporciona um cenário propício para a aplicação de tecnologias e sistemas cada vez mais eficientes e seguros, neste meio encontra-se a vertente dos veículos autônomos, os quais possuem instrumentos, subsistemas, sensores, atuadores etc., ou seja, todo aparato necessário para que se locomova sem a necessidade de intervenção humana, o que o torna objeto de implementação de diversos sistemas de controle.

Os sistemas de controle por sua vez sempre tiveram grande uso em diversas aplicações, sendo continuamente muito estudados e difundidos. A indústria faz o uso destes sistemas a décadas para controle de variáveis como temperatura, nível, pressão, assim como o controle de posição, que está presente diversas aplicações, seja em servo motores, máquinas de usinagem, ou robôs industriais e no caso dos veículos autônomos, no sistema de direção, onde esta tecnologia se mostra essencial, como por exemplo em (AGENCY, 2007) que fala do *DARPA Grand Challenge*, uma competição que exigia um carro autônomo capaz realizar manobras complexas como ultrapassagens, este evento foi inovador tendo em vista que era primeira vez que veículos autônomos interagem com tráfego de veículos tripulados e não tripulados em ambiente urbano, o que seria impossível sem sistemas de controles de direção bem elaborados, isto mostra que tão importante quanto o cálculo da trajetória do veículo, se faz necessário um bom sistema de controle de posição das rodas dianteiras, visto que são as mesmas que são responsáveis pela mudança de trajetória do veículo.

Tendo em vista essa função do sistema de direção de um veículo autônomo, se faz necessário o desenvolvimento de um controlador que tenha capacidade de atuar com velocidades e precisão adequada, por tanto este trabalho visa aplicação de conceitos de controle para a malha de posição das rodas dianteiras de um veículo autônomo, sendo desenvolvido um driver de potência assim como o programa de microcontrolador, métodos de segurança por software e o levantamento e análise das curvas do sistema.

## **1.1 Motivação**

A principal motivação para este projeto é contribuir para desenvolvimento da tecnologia dos veículos autônomos na Faculdade de Tecnologia de Santo André, deixando para os futuros alunos uma porta de entrada para esta futura realidade, mas também estudar e aplicar conceitos de uma tecnologia que será capaz de salvar muitas vidas, tendo em vista que um veículo autônomo elimina um dos maiores causadores de acidentes no trânsito, o erro humano. Como visto em (VIÁRIA, 2015) o Observatório Nacional de Segurança Viária classifica os três principais motivos de acidentes no trânsito, que são o fator humano, fator veículo e fator via, e segundo a entidade 90% dos acidentes ocorrem por falhas humanas. Exemplos são claros, excesso de velocidade, uso de celular, a não utilização do cinto de segurança ou capacete. Restando 5% por causas de falhas no veículo e os outros 5% fatores nas vias.

Além dos benefícios a pessoas com mobilidade reduzida tendo em vista que os estes veículos podem se locomover com pouca ou quase nenhuma necessidade de intervenção humana.

## **1.2 Metas e resultados esperados**

O presente trabalho de conclusão de curso consiste em um projeto e desenvolvimento de uma direção servo controlada para um veículo autônomo elétrico da Faculdade de Tecnologia de Santo André, para obtenção de tal objetivo se faz necessário à integração de técnicas de controle com o conjunto mecânico e elétrico.

O veículo utilizado é mostrado na Figura 1 o mesmo fazia parte da equipe de competição de eficiência energética da faculdade (ENERGÉTICA, 2014).

Figura 1 - Veículo elétrico



Fonte: Autor, 2017

### 1.3 Objetivos do trabalho

- Criar um controlador PID digital baseado em PIC.
- Implementar um driver de potência.
- Realizar testes.
- Obter a função de transferência do sistema.
- Elaborar uma documentação compreensiva de todas as etapas do projeto.

### 1.4 Organização do texto

Este trabalho está dividido em 5 capítulos. O presente capítulo mostra uma introdução a área de veículos autônomos, seguido da motivação, e apresenta os objetivos esperados do TCC em questão, no capítulo subsequente e abordada a fundamentação teórica necessária para o projeto.

No capítulo 3 é mostrado o desenvolvimento, ou seja, é apresentado as partes do projeto como o conjunto mecânico, hardware e software envolvidos no processo.

No capítulo 4 é descrito a parte de segurança de software assim como a obtenção das curvas do sistema e ajuste de ganhos necessários.

Por fim no capítulo 5, faz-se a avaliação dos resultados e comparação com os objetivos esperados, assim como e deixado algumas propostas futuras.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Por se tratar de somente de uma parte de um projeto maior que é tornar o veículo da Figura 1 autônomo, o presente trabalho desenvolve de um controlador delimitado somente ao sistema do volante, com *setpoint* dado por uma tensão analógica vindo de um sistema que controla o comportamento do veículo.

Nos subtemas seguintes são mostrados os exemplos e fundamentos necessários para elaborar este projeto, como funcionamento do sistema de direção, motores CC, PWM, método de controle digital, microcontroladores e seus respectivos módulos usados no projeto.

### 2.1 Histórico

A história dos veículos autônomos como abordado em (GINGICHASHVILI, 2007) teve início em 1977 no Japão onde as primeiras pesquisas na área foram feitas no Laboratório de Engenharia Mecânica de Tsukuba, no qual foi construído o primeiro veículo capaz de rastrear marcas brancas na rua e foi capaz de atingir velocidades de até 30 km/h e entre 1987 e 1995, a Comissão das Comunidades Europeias financiou o Projeto EUREKA Prometheus, um programa de pesquisa e desenvolvimento dedicado a veículos autônomos.

Posteriormente, outras universidades da América do Norte e Ásia também iniciaram seus primeiros projetos nesta área. Como mencionado anteriormente, em 2005 ocorreu o *DARPA Challenger*, uma competição de carros autônomos, seis equipes completaram a prova, o como descrito em (PISSARDINI, WEI e JÚNIOR, 2013) este acontecimento pode ser considerado um marco na história dos carros autônomos, e representa o nível de automação mais alto já alcançado com estes veículos.

No Brasil se destacam os projetos desenvolvidos na UFMG com o veículo CADU descrito em (SABBAGH, 2009), e na USP São Carlos com o veículo CARINA mencionado em (LABORATÓRIO DE ROBÓTICA MÓVEL, 2012).

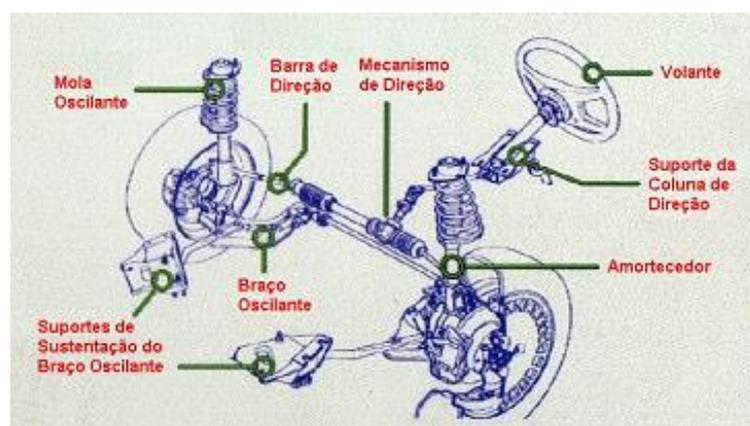
Atualmente, os maiores fabricantes de veículos e as gigantes da tecnologia já tem modelos com altos níveis de independência do motorista, ou seja, é

possível se deslocar sem precisar de condutor. A principal evolução nesse nível de automação é permitir que o carro controle sua velocidade, direção e posição na pista, tudo ao mesmo tempo. Apesar de isso tudo já ser uma realidade técnica, estas opções ainda são limitadas a apenas algumas situações, como por exemplo: em autoestradas. Essas circunstâncias e a falta de uma regulamentação voltada para esta área faz com que o veículo autônomo ainda necessite que o motorista fique atento e pronto para assumir a direção a qualquer instante.

## 2.2 Sistema de direção

O volante é um disposto mecânico ligado no mecanismo de esterçamento com uso da barra de direção, e é constituído de eixos, mancais, juntas, isoladores de vibração e outros componentes, como ilustrado na Figura 2. O sistema de direção tem como o objetivo dar ao veículo o grau de liberdade lateral, afim de que o mesmo possa realizar manobras tais como fazer curvas e estacionar. A direção tem sua aplicabilidade demonstrada em vários veículos automotores, elétricos e diversos outros tipos, mostrando-se como um dos sistemas mais importantes em veículos.

Figura 2 - Sistema de direção

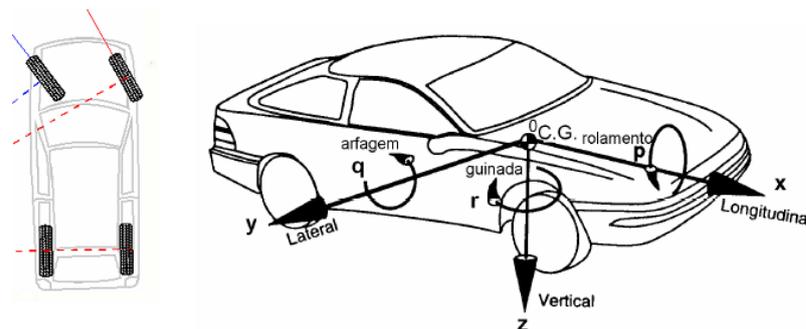


Fonte: (FERNANDES, 2005)

O condutor com o intuito de seguir uma trajetória desejada utiliza o volante para converter seu esforço em deslocamento do ângulo das rodas dianteiras e/ou traseira, que em conjunto com o deslocamento longitudinal do veículo resulta no caminho desejado. Os graus de liberdade de um veículo podem ser

observados na Figura 3. Contudo, outro atributo do sistema é atenuar o esforço do motorista e possíveis perturbações causadas por desníveis na via. Ainda é possível também destacar três tipos de sistemas de direção: a hidráulica, eletro-hidráulica e somente elétrica, que estão presentes em grande parte dos veículos automotivos modernos.

Figura 3 - Graus de liberdade de um veículo



Fonte: (CANALE, 2017)

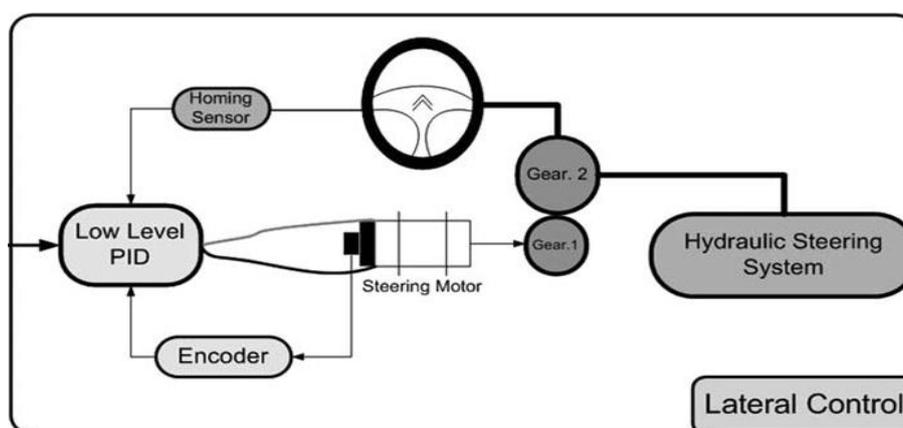
### 2.3 Automatização de veículos

Com o avanço da tecnologia a automatização em veículos se torna cada vez mais presente, mas mesmo em décadas passadas já se iniciava as pesquisas, como por exemplo em 1960 quando o grupo de pesquisa da General Motors desenvolveram e demonstraram o controle automático de direção, velocidade, e frenagem de veículos em uma pista de testes (K. GARDELS, 1960). Atualmente, os avanços continuam como por exemplo em (CHENG, ZHENG, *et al.*, 2007) que pesquisam novos sistemas avançados de assistência ao motorista conhecidos por abreviatura em inglês de *ADAS*. A grande finalidade do *ADAS* é ajudar o motorista em situações críticas em que o mesmo fique sem condições de conduzir, tais pesquisas têm dado resultados, como por exemplo controle de cruzeiro, freios *ABS*, *Park Assist*, detecção de pedestres, sinalizações e muitos outros. Muitos desses sistemas são de controle de deslocamento longitudinal, ou seja, de aceleração e frenagem. O controle lateral é abordado no subtópico seguinte.

### 2.3.1 Direção servo controlada

O grau de liberdade lateral tem seu controle abordado em (ACKERMANN, BUNTE e ODENTHAL, 1999) onde os autores usam a resposta de guinada do volante como parâmetro de controle. Assim como em (PÉREZ, MILANÉS e ONIEVA, 2011) que tem parâmetros como velocidade angular e posição das rodas dianteiras como saídas do sistema, o mesmo tem o volante movido por um motor CC. A malha desse sistema é mostrada na Figura 4, e a mesma é colocada em cascata com a malha de comportamento do veículo, desta forma o *set point* do PID vem da variável de saída do controle de comportamento do veículo.

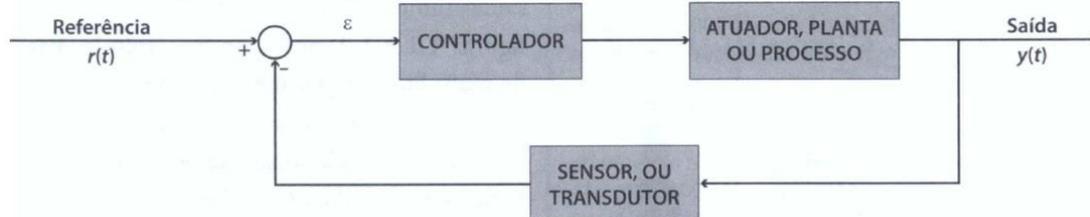
Figura 4 - Controle lateral



Fonte: (PÉREZ, MILANÉS e ONIEVA, 2011) - adaptado

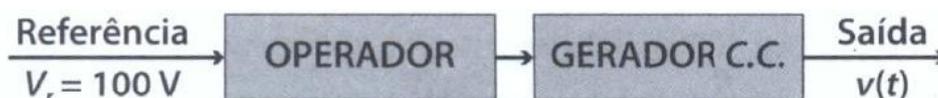
O controle lateral pode ser entendido como uma direção servo-controlada que por definição é uma malha fechada de controle de posição. Tendo isto em vista, uma malha fechada como abordado em (OGATA, 2010) é definida como um sistema que estabelece uma relação de comparação entre a saída e a entrada, utilizando a diferença  $\varepsilon$  como dado para controlar o processo a fim de obter o resultado desejado  $r(t)$ , este conceito pode ser ilustrado na Figura 5, onde a saída  $y(t)$  está sendo realimentada através de um sensor ou transdutor, o que a torna um parâmetro a ser levado em conta pelo controlador, ao contrário da malha aberta observada na Figura 6 em que não há qualquer informação do estado da saída.

Figura 5 - Diagrama em blocos malha fechada



Fonte: (MAYA e LEONARDI, 2010)

Figura 6 - Diagrama em blocos de malha aberta



Fonte: (MAYA e LEONARDI, 2010)

Os veículos autônomos são os resultados destas pesquisas. Temos como exemplo o veículo Stanley da Universidade de Stanford dos EUA descrito em (THRUN, MONTEMERLO, *et al.*, 2006), que dispunha de uma direção servo controlada e foi o vencedor do o *DARPA Challenger* mencionado anteriormente, ou do veículo autônomo CADU desenvolvido na UFMG que tem a direção movida por um motor CC, que foi acoplado via corrente e coroas, como mostrado na Figura 7. Sendo o servomotor é controlado por um controlador digital que também é responsável por controlar a velocidade e corrente do motor, e se comunica via RS232<sup>1</sup> (SABBAGH, 2009).

<sup>1</sup>RS-232 é um padrão para troca serial de dados binários entre um DTE (terminal de dados, de Data Terminal equipment) e um DCE (comunicador de dados, de Data Communication equipment). É comumente usado nas portas seriais dos PCs.

Figura 7 - Direção do CADU



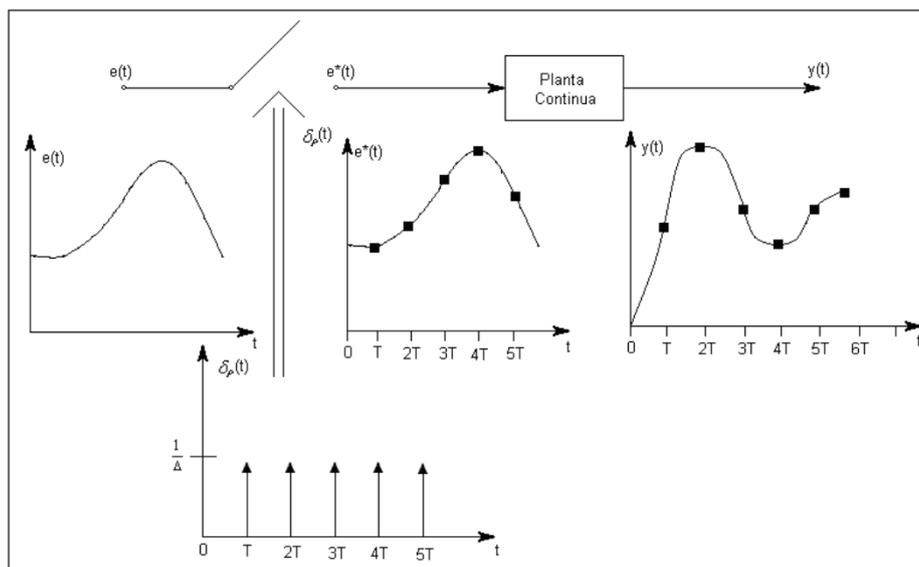
Fonte: (SABBAGH, 2009)

## 2.4 Controle digital

As técnicas de controle clássico, teoria de controle robusto e as técnicas de controle moderno são comumente usadas e são essenciais em qualquer campo da engenharia e da ciência. Sistemas de controle são essenciais para a regulação de determinadas variáveis de processo, e são encontrados de forma intrínseca em sistemas embarcados de veículos indústrias e seus processos, a forma com que essas técnicas são implementadas influenciam diretamente em sua precisão e aplicabilidade. Contudo, o controle discreto se destaca por ter vantagens tais como não depender de componentes eletrônicos que sofrem com influência do meio, como capacitores e resistências que podem variar com a temperatura e outros fatores externos. Outra grande vantagem do controle digital é a sua facilidade de fazer alterações e adaptações (OGATA, 1995).

Em controle digital a principal abordagem é trazer as funções de transferências para o tempo discreto o que torna sua aplicação em dispositivos microprocessado possível. Portanto, primeiro deve-se obter um sinal amostrado em  $T$  de um sinal contínuo em  $t$  como exemplificado na Figura 8.

Figura 8 - Sinal amostrado



Fonte: (ASSUNÇÃO, 2013)

O sinal contínuo é medido de instante em instante e associado a um valor digital equivalente. Fazendo-se isto continuamente pode-se obter os pontos que representam a forma aproximada do sinal original.

Assim, o sinal amostrado equivalente como visto em (ASSUNÇÃO, 2013), será expresso pela Equação 1, sendo o mesmo definido somente pelos instantes amostrados. A equação (1) a seguir representa o sinal amostrado em tempo contínuo.

$$e^*(t) = e\delta_p(t) = \sum_{k=0}^{+\infty} e(kT)\delta(t - kT) \quad (1)$$

Onde:

- $e^*(t)$ : Sinal amostrado;
- $e(t)$ : Sinal contínuo;
- $\delta_p(t)$ : Trem de impulsos;
- $\delta(t)$ : Impulso;
- $k$ : coeficiente do instante de amostragem;
- $t$ : tempo em segundos.

#### 2.4.1 Controladores PID

De todos os controladores existentes, um dos mais conhecidos é o controlador PID. O controle Proporcional, Integral, Derivativo (PID) é um método de controle amplamente utilizado em sistemas de malha fechada (MAYA e

LEONARDI, 2010), onde a integral elimina as oscilações, a parte proporcional elimina o erro de valor final ou também chamado de erro estacionário, enquanto a derivativa fornece ao sistema uma antecipação, evitando previamente que o erro se torne maior quando o processo se caracteriza por ter uma correção lenta comparada com a velocidade do desvio. O controle PID é descrito pela Equação 2 em tempo contínuo:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2)$$

Onde:

- $K_p$ : Coeficiente da ação proporcional;
- $K_i$ : Coeficiente da ação integral;
- $K_d$ : Coeficiente da ação derivativa
- $t$ : Instante do estado a ser processado dado em segundos;
- $u(t)$ : Sinal de saída do sistema no instante  $t$ ;
- $e(t)$ : Sinal de erro na entrada do controlador no instante  $t$ .

A equação de controle PID para sinais digitais possui algumas diferenças com relação à equação de controle PID para sinais analógicos, pois integrais e derivadas não são essencialmente programáveis em microcontroladores e microprocessadores, tendo em vista que esses dispositivos só executam operações básicas como soma, subtração, divisão e multiplicação, e trabalham em tempo discreto. É preciso também utilizar de alguns artifícios de cálculo numérico e passar a equação para o tempo discreto denominado  $n$ . Como mostrado abaixo.

Discretização da Equação 2:

Considerando:

$$n = t$$

$$e(t) = e(n)$$

1. Parcela proporcional:

$$K_p e(t) = K_p e(n) \quad (3)$$

2. Parcela integral:

Aproximação de integral

$$\int_t^{t+\Delta t} f(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \sum_{n=t}^{\Delta t+t} f(t) \times \Delta t = [f(t) + f(t + \Delta t)]\Delta t$$

Por se tratar de um sistema que utiliza somente duas amostras (atual e anterior) pode-se utilizar somente dois fatores do somatório e é necessário atrasar uma amostra no tempo e considerando  $\Delta t$  constante pode substituí-lo por 1.

Substituindo:

$$\int_n^{n+1} e(n) = \lim_{\Delta n \rightarrow 0} \sum_n^{n+1} e(n) \times \Delta n = [e(n) + e(n - 1)]$$

$$\int_n^{n+1} e(n) = [e(n) + e(n - 1)] \quad (4)$$

3. Parcela derivativa:

Aproximação de derivativa

$$\frac{de(t)}{dt} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{e(t) - e(t - \Delta t)}{\Delta t}$$

Considerando que as amostras estão espaçadas em intervalos iguais e constantes pode-se substituir  $\Delta t$  por 1. Substituindo:

$$\frac{de(n)}{dn} = \frac{e(n) - e(n - 1)}{1}$$

$$\frac{de(n)}{dn} = e(n) - e(n - 1) \quad (5)$$

4. Substituindo as parcelas (3), (4) e (5) o na equação 2 obtemos:

$$u(n) = K_p e(n) + K_i [e(n) + e(n - 1)] + K_d [e(n) - e(n - 1)] \quad (6)$$

Onde:

- $K_p$ : Coeficiente da ação proporcional;
- $K_i$ : Coeficiente da ação integral;
- $K_d$ : Coeficiente da ação derivativa;
- $n$ : Instante da amostragem a ser processada;
- $n - 1$ : Instante da amostragem anterior;
- $u(n)$ : Sinal de saída do sistema na amostra  $n$ ;
- $e(n)$ : Sinal de erro na entrada do controlador na amostra  $n$ .

A Equação 6 é totalmente implementável em microcontroladores, pois é composta somente por operações básicas e trabalha com amostras espaçadas igualmente pelo instante  $n$ .

### **2.4.2 Microcontrolador**

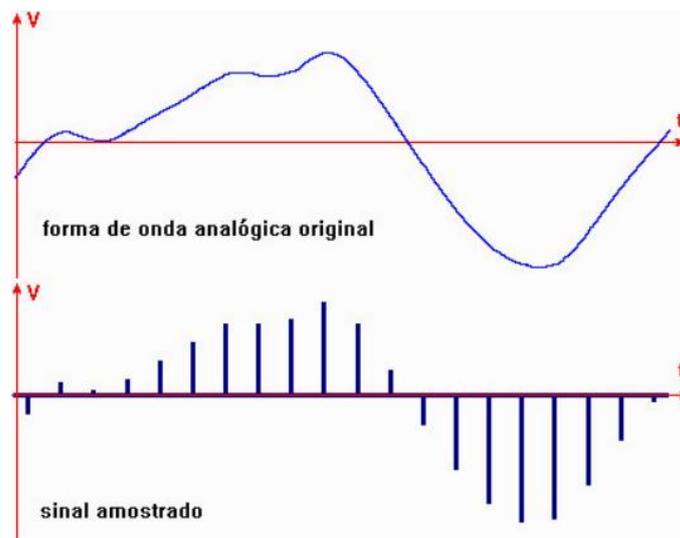
Os microcontroladores podem ser descritos como dispositivos em um circuito integrado, no qual contém um núcleo de processador, memórias, entradas e saídas de dados, e dispõe de memória de programação e muitas vezes de outra memória chamada EEPROM para armazenamento de dados retentivos.

Os microcontroladores foram criados para aplicações embarcadas, e podem ser aplicados em dispositivos diversos, como por exemplo, os sistemas de controle de um automóvel, eletrodomésticos, ferramentas elétricas, brinquedos e outros sistemas que necessitem de processos automáticos. Seu grande diferencial em relação aos microprocessadores utilizados em computadores pessoais, é o fato de ele já vir de fábrica com todos os periféricos necessários para seu funcionamento básico em um tamanho relativamente pequeno, o que torna seu uso em comparação a um projeto que usa um dispositivo microprocessado mais vantajoso, ou seja, microcontroladores tornam-se econômicos para controlar digitalmente uma grande gama de dispositivos e processos.

#### **2.4.2.1 Teorema da amostragem de Nyquist**

Segundo o Teorema de Nyquist, ao se converter um sinal analógico para digital, a quantidade de amostras por um determinado tempo e denominada taxa de amostragem, tal taxa deve ser maior que o dobro da maior frequência do sinal que será convertido, para que não ocorra perdas significativas, e o sinal resultante não fique incoerente com o sinal de entrada, o teorema pode ser ilustrado na Figura 9.

Figura 9 - Conversão de sinal

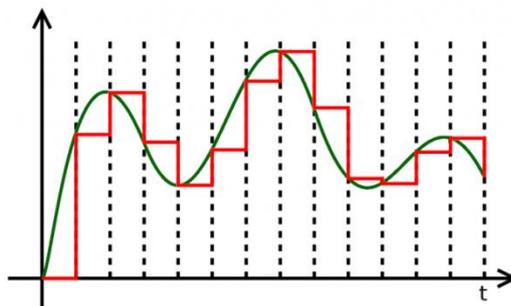


Fonte: Autor, 2018 - adaptado

#### 2.4.2.2 Conversor A/D

No mundo real as grandezas físicas encontram-se de forma analógica, e mesmo com sensores que as convertem em sinais elétricos proporcionais, ainda é preciso convertê-los para algo que o microcontrolador possa trabalhar, ou seja, achar um número digital que represente proporcionalmente aquela grandeza física em um determinado instante, ou seja um conversor analógico para digital ou de forma abreviada conversor A/D o que pode ser ilustrado na Figura 10.

Figura 10 - Conversão digital para analógico



Fonte: (EMBARCADOS, 2015)

A maioria dos microcontroladores dispõe de um conversor A/D, o qual pode ter diferentes resoluções que pode ser calculada pela Equação 7:

$$R = \frac{V_{ref}}{2^n} \quad (7)$$

Onde:

- $R$  : Resolução;
- $V_{ref}$  : Tensão de referência;
- $n$  : números de bits do conversor

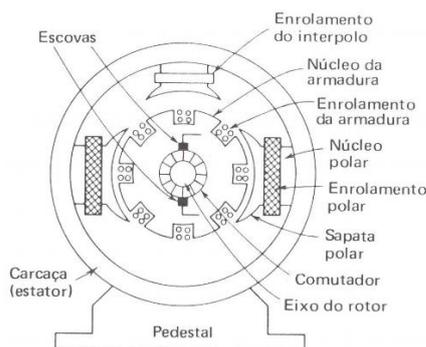
Sendo essa uma das características decisivas na escolha do dispositivo, já que a resolução esta intrinsecamente ligada à sua precisão.

## 2.5 Motores de corrente continua

Um motor corrente continua e basicamente formado de duas partes principais o estator que é onde está a bobina de campo e rotor que contem a bobina de armadura como representado na Figura 11.

Um motor de corrente continua pode ser definindo como um conversor de energia elétrica em energia Mecânica.

Figura 11 - Motor cc estator rotor



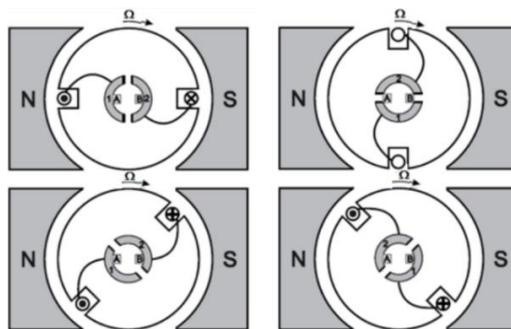
Fonte: (CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DO RN, 2006)

É apresentado em (FITZGERALD, KINGSLEY e UMANS, 2006) o princípio de funcionamento do motor de corrente continua, que se da seguinte forma: O motor CC é alimentado por uma fonte de tensão continua, que por sua vez gera uma corrente, que ao passar nos enrolamentos do motor (bobina do rotor) os mesmos produzem polos eletromagnéticos, que tendem a se alinhar com os polos opostos e se repelir com polos iguais.

Os polos são formados pelo campo permanente (do imã), e como o eixo do rotor encontra-se apoiado em mancais o mesmo gira até que haja o equilíbrio, porem ao se movimentar o eixo aciona o comutador que desliga da fonte a

bobina atual e liga seguinte que está em um ângulo diferente, fazendo com que os campos fiquem com polaridades iguais o que faz com que se empurrem e sejam atraídos pelo outro polo do outro lado que é seu antagônico. Assim, reiniciando o processo, o que fará o eixo do motor girar continuamente. O princípio básico está ilustrado na Figura 12.

Figura 12 - Princípio de funcionamento do motor cc



Fonte: (ESCOLA POLITECNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, 2016)

### 2.5.1 Controle de velocidade de motores CC

Como visto em (FITZGERALD, KINGSLEY e UMANS, 2006) existe três formas mais comuns de controle de velocidade de um motor cc, que são:

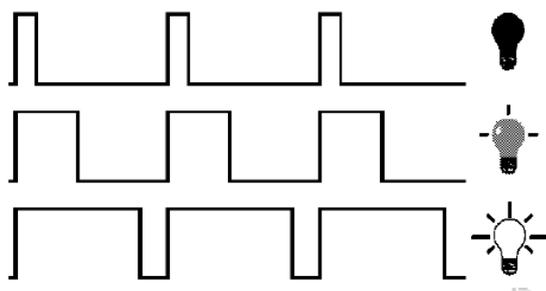
- Controle da corrente de campo.
- Variação da resistência associada ao circuito de armadura.
- Variação de tensão nos terminais do motor.

Sendo o último o utilizado neste trabalho, pois variando a tensão de armadura e mantendo o campo do estator constante, pode se observar que a velocidade varia na mesma proporção, sendo então esta tensão a responsável por definir a velocidade com que o motor irá girar. Este método é o mais comum para controle de velocidade de motores cc.

Porém, não sendo possível utilizar uma fonte que varia de acordo com a necessidade de atuação do motor, deve-se aplicar o método *Pulse-Width Modulation* (PWM) ou modulação por largura de pulso. O PWM é um sinal digital que trabalha com uma amplitude que varia de zero ao valor máximo da onda (usualmente 5 volts) e com uma frequência fixa, ou seja, uma onda quadrada, com o sinal analógico dado pelo tempo que o pulso permanece em seu valor máximo. Assim, a porcentagem equivalente do tempo que o pulso permaneceu

em valor lógico alto, denominado ciclo de trabalho ou *duty cycle*, pode variar de zero até o período máximo da onda. O PWM quando aplicado aos terminais do motor o mesmo se comporta como um filtro passa baixas devido ao fato do motor ser uma carga indutiva, ao aplicar o PWM por um filtro passa baixas, o valor médio da onda e proporcional ao ciclo de trabalho, ou seja, com PWM aplicado em um motor e possível variar a tensão nos terminais de forma proporcional ao ciclo de trabalho o que faz com que o PWM apesar de ser um sinal digital, tem o ciclo de trabalho como uma grandeza analógica, o que faz dele um conversor D/A, garantido assim a variação da tensão nos terminais do motor, algo que pode ser ilustrado na Figura 13, onde é aplicado o método em uma lâmpada que usa do mesmo princípio para controlar seu brilho proporcionalmente.

Figura 13 - Exemplo de uso do PWM



Fonte: TecMikro, 2018

### 2.5.2 Servo motor

Os Servo motores de são por definição motores com realimentação do rotor, onde há um controlador responsável por captar o sinal de um sensor acoplado ao rotor, os sensores mais comuns são encoder e resolvers, o controlador usa esse dado para controlar o servo motor que pode ser projetado tanto para controle de posição como para controle de velocidade. Portanto um servo motor e composto basicamente de três partes:

- Atuador: Motor CC ou CA
- Sensor: Encoder, resolver entre outros.,
- Controlador: pode ser P, PI, PD, digital ou com componentes discreto, entre outros métodos.

Esses motores são muito utilizados em controle de posição e velocidade, como em máquinas de usinagem e veículos industriais e diversos processos que necessitam o posicionamento ou velocidades precisas.

### 3 DESENVOLVIMENTO

Este capítulo descreve o desenvolvimento e construção do conjunto eletrônico da direção elétrica no carrinho de eficiência energética, bem como a parte principal que foi o controle do motor da direção. O circuito geral do sistema pode ser visto no apêndice A.

#### 3.1 Conjunto mecânico

Com a necessidade de converter o giro do motor em deslocamento das rodas dianteiras foi adaptado de um sistema de vidro elétrico no local da antiga direção, como mostrado na Figura 14.

Figura 14 – Sistema mecânico



Fonte: Autor, 2017

#### 3.2 Hardware

Todo o *hardware* do projeto foi desenvolvido afim de facilitar sua implementação, tendo isso em vista foi utilizado e adaptando algumas soluções prontas como por exemplo o driver de potência e a placa do microcontrolador. O circuito resultante do projeto pode ser visto no apêndice A.

### 3.2.1 Driver de potência

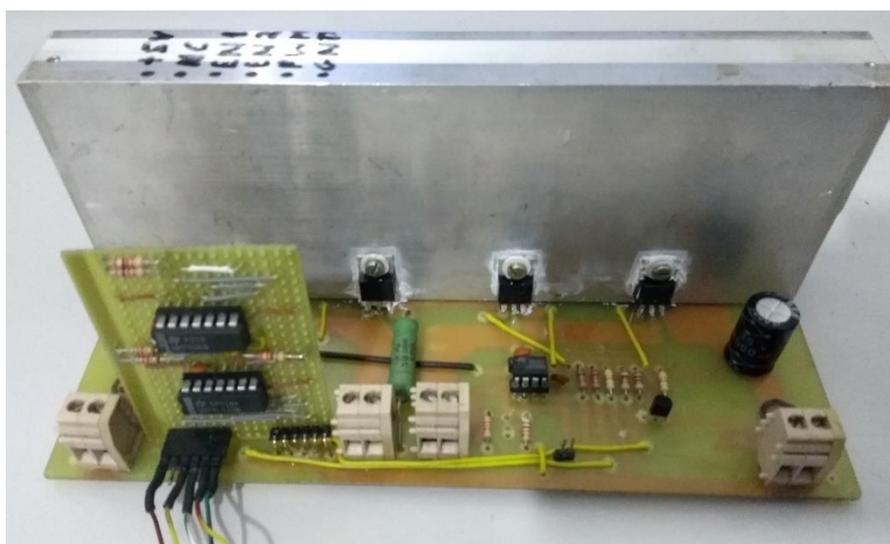
Como driver de potência foi desenvolvido uma ponte H com Mosfets de Potência, o qual é baseado no circuito feito pelo aluno de mecatrônica industrial Vítor Mardegan. A placa possui as características lógicas mostradas no Quadro 1, a montagem da ponte H pode ser vista na Figura 15 e seu circuito e apresentado no anexo A.

Quadro 1 - Tabela verdade driver de potência

ESTADO	EN1	EN2	PWM	MOTOR
0	0	0	1	PARADO
1	0	1	1	SENTIDO HORÁRIO
2	1	0	1	SENTIDO ANTI HORÁRIO
3	1	1	1	PARADO

Fonte: Autor, 2018

Figura 15 - Driver de potência

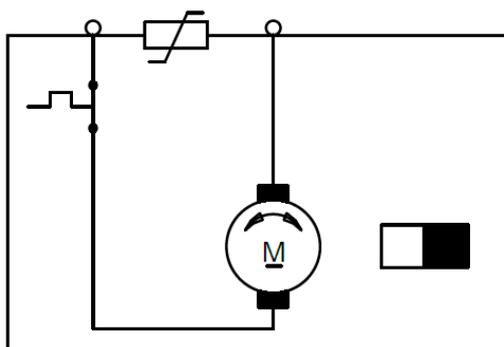


Fonte: Autor, 2018

### 3.2.2 Motor

O motor utilizado era originalmente de um sistema de vidro elétrico do veículo *Corsa Classic* da *Chevrolet*. Esse motor possui uma redução mecânica acoplada. O motor é de campo permanente e o circuito dele pode ser visto na Figura 16. O motor tem uma corrente nominal de 4<sup>a</sup>.

Figura 16 - Circuito do motor



Fonte: (BOSCH, 2011)

Com o uso de uma ponte RLC e um multímetro foi possível realizar o levantamento de alguns dados do motor, como indutância e resistência. Estes dados podem ser vistos na Quadro 2.

Quadro 2 – Dados dos motores

INDUTÂNCIA ( $\mu\text{H}$ )	FREQUÊNCIA (Hz)	IMPEDÂNCIA ( $\Omega$ )	RESISTÊNCIA ( $\Omega$ )
513	100	0,75	0,7
395	1000	2,76	0,7
287	10000	18,67	0,7

Fonte: Autor, 2018

### 3.2.3 Realimentação

A realimentação é feita através de um potenciômetro acoplado na barra de direção do veículo como mostrado na Figura 14, o mesmo é alimentado com 5V e possui 5K $\Omega$  de resistência.

Porém, devido ao limite de deslocamento do volante, a rotação do potenciômetro não atingiu seus extremos, sendo necessário adequar o código aos limites de deslocamento do volante e o uso de divisores de tensão nos potenciômetros de referência e *feedback*.

### 3.2.4 Placa do microcontrolador

A placa usada para programação do microcontrolador foi desenvolvida na Faculdade de Tecnologia de Santo André, e possui um display de LCD 16x2, LEDs, push buttons e uma *interface* USB para programação, facilitando a fase de implementação do projeto.

### 3.3 Software

Para implementação foi criado um código em linguagem C para o microcontrolador PIC18F4550 junto ao compilador XC8. O código simplificado pode ser visto no apêndice B e pode ser baixado completo em (MESQUITA, 2018).

O programa que roda neste sistema pode ser dividido em três partes:

I. Aquisição de dados *setpoint*, *feedback*:

O *setpoint* e *feedback* são dados por potenciômetro e medidos através do conversor A/D do microcontrolador, resultando em valores que variam de 0 a 1023. A diferença entre o *setpoint* e o *feedback* é o erro de posição.

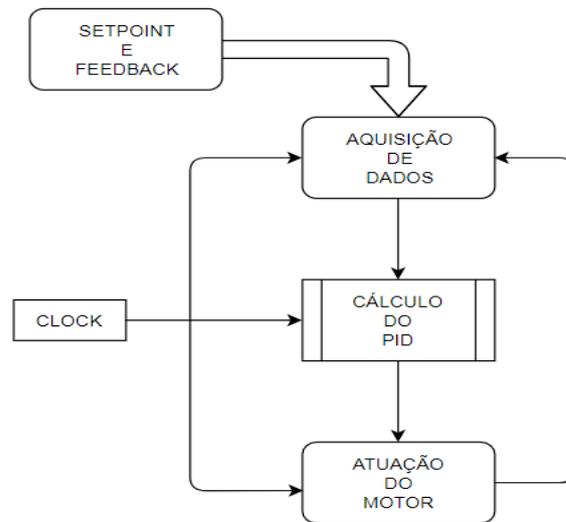
II. Cálculo do PID.

Usando a equação PID em tempo discreto, juntamente com os dados adquiridos no item I, obtém-se um valor para o PWM que pode variar de 0 a 1023.

III. Atuação do motor.

Caso o erro for negativo significa que as rodas dianteiras estão em um ângulo à esquerda do ângulo desejado, caso contrário estão à direita. Sendo necessário o emprego da tabela verdade do driver de potência mostrado na tabela 1, através de duas saídas digitais do microcontrolador, pode-se controlar o sentido de rotação do motor, ou seja, para a ponte H são enviados o PWM e a direção de giro do motor. Toda esta sequência pode ser observada no diagrama apresentado na Figura 17.

Figura 17 - Diagrama do programa principal.



Fonte: Autor, 2018

Todo este processo roda em um tempo constante, implementado com auxílio da interrupção do timer 0 do microcontrolador. Isso garante o intervalo fixo de aquisição de dados analógicos, que é necessário para que a teoria de controle abordado anteriormente seja válida. Para melhorar o tempo de execução foi utilizado o método de ponto fixo. A função responsável por calcular o valor de PID baseada na Equação 6 é mostrada abaixo:

```

unsigned long int PID_set_PF() {
    erro0 = ref - fb; // calcula erro atual
    erro1 = erro0; // atualiza valores
    // calculo do PID
    integral = integral + (erro0 * T); // parte integral
    derivativo = ((erro0 - erro1) / T); // parte derivativo
    out0 = ((k1 * erro0) + (k2 * integral) + (k3 * derivativo));
    out0 = out0 >> 8; // deslocamento devido ao uso de ponto fixo
    if (out0 < 0x00) // caso negativo
    { out0 = out0 * (-1); // multiplica por -1 }
    if (out0 > 1023) // caso estoure
    { out0 = 1023; // saturar saida }
    if (out0 == 0)

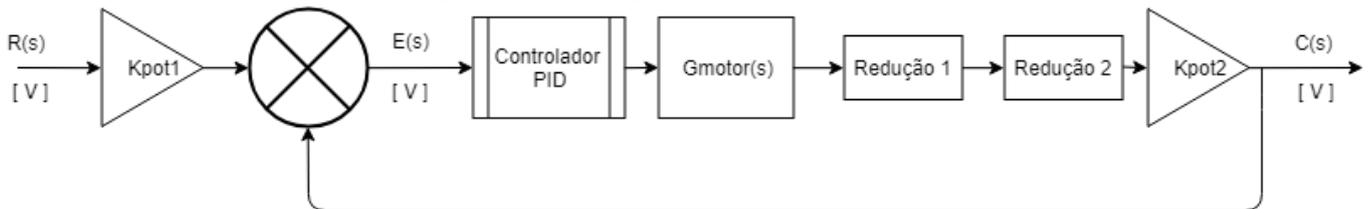
```

```
    out0 = 0;  
    return out0;  
} // fim PID_set_PF
```

Por trabalhar com ponto fixo foi necessário uso de variáveis com maior quantidade de *bits*, como por exemplo a variável *long int out0*.

O diagrama em blocos que demonstra o sistema é observado na Figura 18.

Figura 18 - Diagrama em blocos do sistema



Fonte: Autor, 2018

## 4 TESTES e ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os testes foram conduzidos sem aplicar carga no volante, em outras palavras, sem colocar o veículo em contato com o solo. Como o conjunto mecânico apresentou certas folgas, decidiu-se não colocar em movimento. Durante o desenvolvimento do projeto de controle discutiu-se a possibilidade de melhorar o conjunto mecânico, colocando o motor num mancal mais próximo do ponto de pivotamento da direção das rodas.

Outro ponto que apresentou problemas foi o acoplamento entre o conjunto mecânico e o potenciômetro de *feedback*.

Ficou decidido que a finalização do projeto de controle seria a meta e como propostas futuras melhorar o conjunto mecânico da direção, para permitir conduzir o veículo via controle remoto.

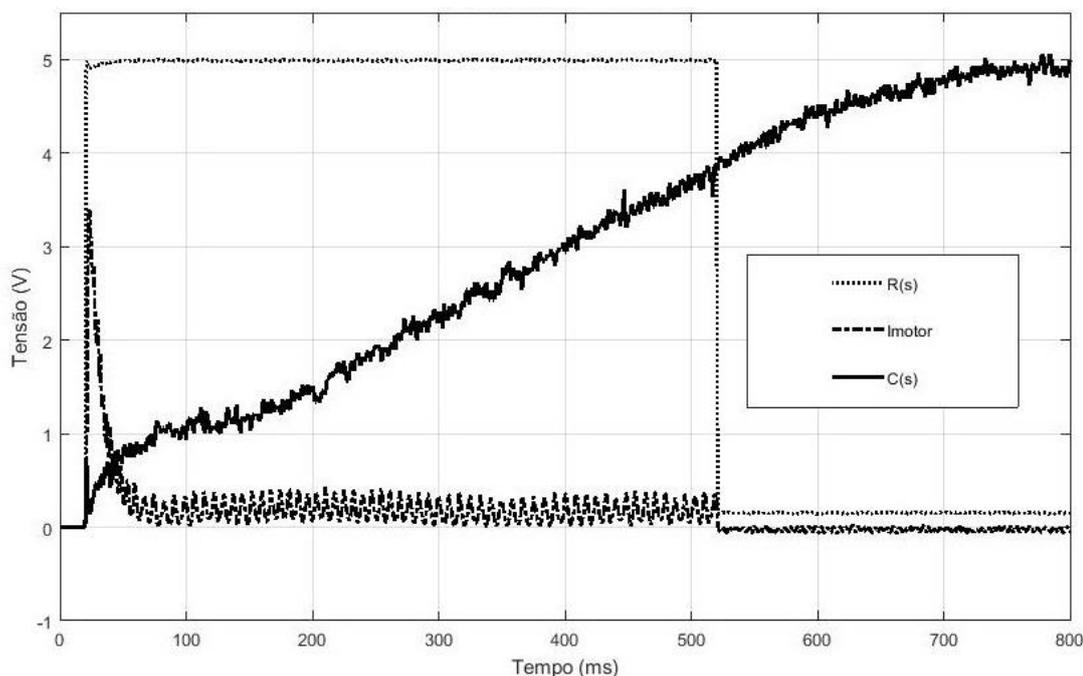
### 4.1 Métodos de segurança por software

Com o intuito de realizar os testes com segurança evitando a queima de componentes e dispositivos, foi incluído no código métodos de desligamento automático do motor assim que os valores como *feedback* e erro ultrapassassem certos valores por determinado tempo, no caso do variável erro, esta foram experimentadas várias faixas de valores de banda morta. Quando a variável entra nesta faixa inicia-se uma contagem de tempo e excedendo esse tempo o motor é parado caso contrário o algoritmo segue sua rotina padrão apresentado na Figura 17, sendo assim foi escolhido um valor de banda morta de 10. Foi também utilizado um botão da placa para servir como *enable* de *software* e outro para desabilitar, servindo assim como botões de segurança, ou seja, o código somente começava a exercer efeito quando estes botões eram corretamente acionados.

### 4.2 Curva do sistema

Com uso do *software* LabView e MatLab foi possível fazer o levantamento das curvas do sistema, as curvas C(s) e I motor foram multiplicadas por 10 e por 5 respectivamente para melhor visualização, como mostrado na Figura 19.

Figura 19 - Gráfico resposta a degrau de 500ms



Fonte: Autor, 2018

Com um degrau de duração de 500ms em malha aberta, o sistema mostra na curva C(s) o efeito da inércia sobre o conjunto mecânico. Após o desligamento do motor há um tempo de aproximadamente 200ms para o conjunto dissipar a energia obtida inicialmente, ou seja, durante este tempo o conjunto permaneceu em movimento. Sendo possível observar que se trata de um sistema superamortecido devido a característica observada no início da curva de uma aceleração inicial lenta típica de sistemas superamortecidos.

A curva Imotor foi obtida usando um shunt com um resistor de  $0,1\Omega$  e 7W no gráfico a escala e dada em volts para obter a corrente necessário utilizar a lei Ohm. É possível observar o pico de corrente de partida que mostra energia necessária para tirar o conjunto da inércia o que implica direto no driver de potência utilizado.

### 4.3 Ajuste de ganho

A curva observada na Figura 20 foi obtida alternando a referência entre seus valores máximo e mínimo em intervalos de 2 segundos, com os ganhos KI e KD igual a zero.

Com o objetivo de observar o comportamento em malha fechada do sistema foram usados valores crescentes de ganho proporcional até que a rampa atingisse um tempo constante de estabilização, ao observar a curva C(s) é possível verificar que o sistema tem seu limite de tempo para atingir o valor final, limitado em aproximadamente 800 ms com o KP=50, mesmo impondo valores maiores de coeficiente proporcional este tempo mantinha-se quase inalterado, concluindo-se que com este ganho ocorre a saturação do motor com a alimentação utilizada sendo de 12V, o que demonstra que para diminuir este tempo com motor utilizado, é necessário aumentar a tensão de alimentação, ocasionando numa corrente de partida maior, e conseqüentemente uma partida mais rápida. Porém, ultrapassaria os limites elétricos do motor, sendo necessário um controle de corrente mais apurado ou então a troca por um motor que se adeque melhor ao sistema proposto.

Figura 20 - Curva de teste KP=50



Fonte: Autor, 2018.

A função de transferência da curva C(s) pode ser obtida com uso da função de transferência genérica:

$$F(s) = \frac{K}{\tau s + 1} \quad (8)$$

Onde:

- $k$ : Constante de ganho  
Que pode ser obtida pela relação  $\frac{\text{Amplitude de saída}}{\text{Amplitude de entrada}}$  Para a curva em questão resulta em 1.
- $\tau$ : Constante de tempo  
Pode ser obtida achando-se o intervalo de tempo correspondente ao ponto 63% do valor final em amplitude. Que para a curva em questão resulta em 570ms.

A função encontrada que representa a curva  $C(s)$  da Figura 20 é apresentada abaixo:

$$F(s) = \frac{1}{0,57s + 1}$$

Com estes resultados foi possível concluir que o PID no sistema em questão não é mandatório, tendo em vista que somente com ganho proporcional foi observado um tempo de 800ms para estabilização e não apresentou sobre sinal assim como erro de valor final, porém se faz necessário uma análise com o veículo em movimento onde o PID se mostra útil, como abordado em propostas futuras.

## 5 CONCLUSÃO

Como conclusões finais avalia-se os resultados obtidos em relação aos esperados, assim como apresenta-se propostas futuras para melhoria do sistema.

### 5.1 Resultados

Conjunto mecânico, *hardware*, *software* foram integrados mantendo o controle e operação centralizados na placa do microcontrolador. Foi desenvolvido um código que realiza o controle PID, assim como mostra valores no LCD, com rotinas de segurança que procuram parar o sistema caso variáveis como erro e *feedback* tivessem valores inconsistentes. Também foi desenvolvido um driver de potência o que permitiu a atuação do motor com sua corrente nominal. O Sistema de direção foi testado fazendo a referência alternar entre seus valores máximo e mínimo, com um intervalos de dois segundos, em modo suspenso, ou seja, sem tocar o solo, apresentou um comportamento superamortecido, com um tempo de estabilização de 800ms com ganho  $KP = 50$ , estacionando próximo deste valor, mesmo impondo valores maiores ao ganho a diminuição de tempo era mínima.

Como mencionado o controle PID não é mandatório neste trabalho tendo em vista os resultados obtidos nos testes somente com ganho P não apresentam sobre sinal ou erro de valor final, porém com o objetivo de testar futuramente o veículo em movimento o PID será útil, ficando o código pronto, bastando a inserção de valores para os demais coeficientes.

A realização deste trabalho de conclusão de curso, no que se refere aos conceitos aplicados, permitiu a obtenção de novos conhecimentos, assim como aprofundamento daqueles adquiridos ao logo do curso de Tecnologia em Mecatrônica Industrial, em especial a área de controle e programação embarcada.

### 5.2 Propostas futuras

O desenvolvimento deste trabalho cobriu todo o aparato básico de deslocamento lateral do veículo da Figura 1, permitindo assim a observação de

pontos que necessitam melhorias. Como por exemplo o conjunto mecânico que apresentou folgas com o decorrer dos testes, recomendando-se um acionamento mais direto no esterçamento, com a eliminação da coluna de direção deslocando o motor para mais junto das rodas. Outro ponto que requer melhorias são os potenciômetros de referência e feedback que apresentam muito ruído, para melhorar a referência poderia ser utilizada o método de largura de pulso, em relação ao feedback a utilização de filtros e melhores condutores. Assim como a otimização do código para diminuir tempo de execuções dentro da interrupção, tendo em vista que a precisão do PID está diretamente associada ao tempo de amostragem. Ficando como proposta futura o teste do veículo em movimento e a análise do comportamento.

## 6 REFERÊNCIAS

ACKERMANN, P. J.; BUNTE, T.; ODENTHAL, D. **ADVANTAGES OF ACTIVE STEERING FOR VEHICLE DYNAMICS CONTROL**. German Aerospace Center, D. Cologne. 1999.

AGENCY, D. A. R. P. Urban Challenge. **Agency, Defense Advanced Research Projects**, Victorville, 2007. Disponível em: <<http://archive.darpa.mil/grandchallenge/>>. Acesso em: 16 janeiro 2017.

ASSUNÇÃO, P. D. E. **Controle Digital**. Universidade Estadual Paulista. [S.I.], p. 1. 2013.

BIMBARA, P. S. **Generalized theory of electrical machines**. [S.I.]: Khanna, 1987.

BORCH. **Kalatec Catálogo de Motores**, 2011. Acesso em: 18 Abril 2018.

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DO RN. **GERADORES E MOTORES CC (MÁQUINAS DE CORRENTE CONTÍNUA)**. CEFETRN. Mossoró, p. 6. 2006.

CHENG, H. et al. Interactive Road Situation Analysis for Driver Assistance and Safety Warning Systems: Framework and Algorithms. **IEEE TRANSACTIONS ON INTELLIGENT TRANSPORTATION SYSTEMS, VOL. 8, NO. 1**, 2007.

EMBARCADOS. Conversor A/D. **Embarcados**, 2015. Disponível em: <<https://www.embarcados.com.br/conversor-a-d/>>. Acesso em: 17 Junho 2018.

ENERGÉTICA, M. D. E. Maratona Universitária da Eficiência Energética 2014, São Paulo, p. 5, 2014. Disponível em: <<http://www.maratonadaeficiencia.com.br/Reportagem%202014.pdf>>. Acesso em: 18 Janeiro 2017.

ESCOLA POLITECNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO. **Motor de Corrente Contínua**. Universidade de São Paulo. São Paulo, p. 6. 2016.

FERNANDES, M. A. **ESTUDOS EM SISTEMAS DE DIREÇÃO VEICULAR**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo. 2005.

FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY; UMANS, S. D. **Máquinas Elétricas**. [S.I.]: BookMan, 2006.

GINGICHASHVILI, S. DARPA's Urban Challenge 2007. **The Future of Things**, 2007. Disponível em: <<http://thefutureofthings.com/3019-darpas-urban-challenge-2007/>>. Acesso em: 18 Setembro 2017.

K. GARDELS. **Automatic car controls for electronic highways**. General Motors Res. Lab. [S.I.]. 1960.

MESQUITA, F. I. N.

FranciscolvanNunesMesquita/ControleDePosicaoComPIC18F4550. **github**, junho 2018. Disponível em:

<<https://github.com/FranciscolvanNunesMesquita/ControleDePosicaoComPIC18F4550>>. Acesso em: Maio 2018.

OGATA, K. **Discrete-Time Control Systems**. 2<sup>a</sup>. ed. [S.I.]: Pearson, 1995.

OGATA, K. **Engenharia de Controle Moderno**. 5<sup>a</sup>. ed. [S.I.]: Pearson, 2010.

PAULO ALVARO MAYA, F. L. **Controle Essencial**. São Paulo: Pearson, 2010.

PÉREZ, J.; MILANÉS, V.; ONIEVA, E. Cascade Architecture for Lateral Control in Autonomous Vehicles. **IEEE TRANSACTIONS ON INTELLIGENT TRANSPORTATION SYSTEMS**, p. 74-75, 2011.

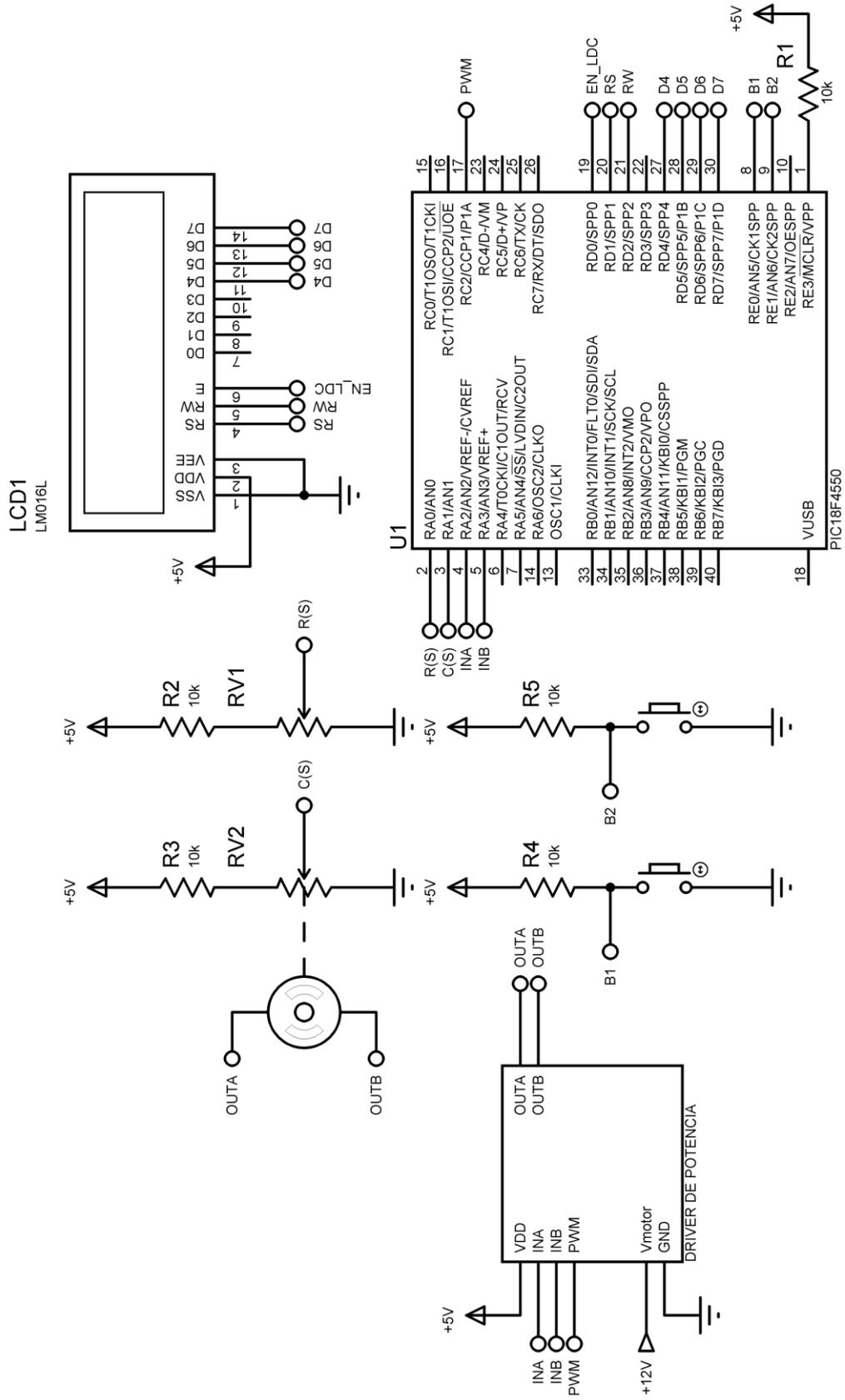
PISSARDINI, R. D. S.; WEI, D. C. M.; JÚNIOR, E. S. D. F. **VEÍCULOS AUTÔNOMOS: CONCEITOS, HISTÓRICO E ESTADO-DA-ARTE**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo. 2013.

SABBAGH, V. B. **Desenvolvimento de um Sistema de Controle para um Veículo Autônomo**. UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS. Belo Horizonte, p. 4. 2009.

THRUN, S. et al. Stanley: The Robot that Won the DARPA Grand Challenge. **Journal of Field Robotic**, Califórnia, 27 Junho 2006. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/rob.20147>>. Acesso em: 15 Junho 2018.

VIÁRIA, O. N. D. S. 90% dos acidentes são causados por falhas humanas, alerta OBSERVATÓRIO. **OBSERVATÓRIO Nacional de Segurança Viária**, 15 Julho 2015. Disponível em: <<http://www.onsv.org.br/noticias/90-dos-acidentes-sao-causados-por-falhas-humanas-alerta-observatorio/>>. Acesso em: 18 Janeiro 2017.

### APÊNDICE A - CIRCUITO GERAL



## APÊNDICE B - CÓDIGO SIMPLIFICADO

```

void interrupt high_priority interrupcoes(void) {
    if (INTCONbits.TMR0IF == 1) { // interrupcao por estouro de tmer0?
        PORTBbits.RB4 = !PORTBbits.RB4; // saida para medir a interrupcao
        INTCONbits.TMR0IF = 0; // limpa a flag
        tick_time++; // incremeta a base de tempo de delay
        if (enS == 1) { // enable de software em 1?
            ref = ADC_read(0b00000001); // ler valor potenciometro de referencia AN0 pino 2
            __delay_us(10); // tempo para descarregar capacitor interno
            fb = ADC_read(0b00000101); // ler valor potenciometro de realimentacao AN1 pino 3
            if (ref > Lmax) { // normaliza referencia
                ref = Lmax;
            }
            if (ref < Lmin) { // normaliza referencia
                ref = Lmin;
            }
            pwm = PID_set_PF(); // calcula valor do PID
            // verifica sentido necessario para o motor
            if (ref > fb) { // direita
                en1 = 1; // pino 4
                en2 = 0; // pino 5
            } else { // esquerda
                en1 = 0; // pino 4
                en2 = 1; // pino 5
            }
            if (fb >= Lmax) { // teste de limite superior
                if (en1 == 1) { //direita
                    pwm = 0;
                }
            }
            if (fb <= Lmin) { // teste de limite inferior
                if (en1 == 0) { // esquerda
                    pwm = 0;
                }
            }
            if (erro0 < 0x00) { // tratamento de valor para ser sempre positivo
                aux = (erro0 * (-1));
            } else {
                aux = erro0;
            }
        }
    }
}

```

```

if ((aux <= BandaMorta)) { // testa se entrou na banda morta
    PORTBbits.RB6 = 1;

    if (d == 0) { // para a primeira passagem
        d = 1;
        delay500 = tick_time + 50;
    }

    if (tick_time > delay500) { // testa se passou 500ms na banda morta
        pwm = 0;
        PORTBbits.RB6 = 0;
        en1 = 0; // pino 4
        en2 = 0; // pino 5
        // seta o PWM (0-1023) em CCP1L:CCPxCON<5:4>
        CCP1L = pwm >> 2; // 8 bits mais significativos
        CCP1CONbits.DC1B1 = pwm >> 1; // segundo bit menos significativo
        CCP1CONbits.DC1B0 = pwm; // bit menos significativo
    }
} else {
    d = 0;
}

if ((aux > 500)&&(tick_time > delay501)) { // verifica se o erro ultrapassou valores de segurança
    delay501 = tick_time + 200;
    pwm = 0;
    en1 = 0;
    en2 = 0;
}

// seta o PWM (0-1023) em CCP1L:CCPxCON<5:4>
CCP1L = pwm >> 2; // 8 bits mais significativos
CCP1CONbits.DC1B1 = pwm >> 1; // segundo bit menos significativo
CCP1CONbits.DC1B0 = pwm; // bit menos significativo
TMR0L = 22 + TMR0L; // interrupcao a cada 0.005 segundos
} else { // se nao, enable de software nao habilitado
    en1 = 0;
    en2 = 0;
} // fim if(ens)
} // fim if(INTCONbits.TMROIF)
} // fim interrupt high_priority

```

### ANEXO A - CIRCUITO DRIVER DE POTÊNCIA

