

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS**

Diogo Coutinho Julião

**Estudo de viabilidade de um sistema antibloqueio de
freios aplicado a um protótipo de Formula SAE**

São Carlos

2017

Diogo Coutinho Julião

Estudo de viabilidade de um sistema antibloqueio de freios aplicado a um protótipo de Formula SAE

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Computação, da Escola de Engenharia de São Carlos e Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro de Computação.

Orientador: Prof. Dr. Maximilian Luppe

VERSÃO CORRIGIDA

São Carlos

2017

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes e
Seção Técnica de Informática, EESC/USP com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

J94e Julião, Diogo Coutinho
 Estudo de viabilidade de um sistema antibloqueio de
freios aplicado a um protótipo de Fórmula SAE / Diogo
Coutinho Julião; orientador Maximilian Luppe. São
Carlos, 2017.

Monografia (Graduação em Engenharia de Computação)
-- Escola de Engenharia de São Carlos e Instituto de
Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de
São Paulo, 2017.

1. ABS. 2. Sistema antibloqueio de freio. 3. Freio.
4. Formula SAE. 5. Microcontrolador. 6. Eletrônica
Embarcada. 7. Hardware. I. Título.

~~Bibliotecário responsável pela estrutura de catalogação da publicação:~~

Eduardo Graziosi Silva - CRB - 8/8907

FOLHA DE APROVAÇÃO

Nome: Diogo Coutinho Julião

Título: “Sistema antibloqueio de freios aplicado a um protótipo de Formula SAE”

Trabalho de Conclusão de Curso defendido em 04/12/2017.

Comissão Julgadora:

Resultado:

Prof. Dr. Maximilian Luppe
(Orientador) - SEL/EESC/USP

Aprovado

Prof. Assistente Edson Gesualdo
SEL/EESC/USP

Aprovado

Mestre Rafael Rocha Mattazio
SEM/EESC/USP

Aprovado

Coordenador do Curso Interunidades Engenharia de Computação:

Prof. Dr. Maximilian Luppe

Aos meus avós e minha tia, que sempre sonharam com esse momento.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Universidade de São Paulo, aos professores e funcionários, que se dedicam ao desenvolvimento profissional dos alunos.

Agradeço ao meu orientador Maximilian Luppe pela orientação no projeto.

Agradeço ao meu pai, minha mãe e minha irmã, que sempre estiveram presentes, me apoiaram e me incentivaram durante a minha vida.

Agradeço aos amigos da turma Engenharia de Computação 011, por todas as noites viradas e *rush*. Sem esse essa união, não teríamos chegado até aqui.

Agradeço à Equipe EESC-USP Formula SAE, que se tornou uma segunda casa e uma segunda família em São Carlos. Obrigado por todos os momentos de alegria e tristeza, pelos churrascos e, principalmente, pelos títulos conquistados.

Agradeço aos 'flangos' Boka, Dilce, Lui, Nóia, Pocs, Superman, Wiki, Zé e Zuera, que me aturaram por todo esse tempo.

“O terreno é fértil, a semente é boa, vale a pena plantar!”
Amélia Pires Palermo

RESUMO

JULIÃO, D. C. **Estudo de viabilidade de um sistema antibloqueio de freios aplicado a um protótipo de Formula SAE**. 2017. 67p. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017.

Em 1920 foi desenvolvido o primeiro sistema ABS (*Anti-lock Brake System* - Sistema Antibloqueio de Freios). Proposto inicialmente para uso em aviões, o sistema garante uma maior eficiência de frenagem, além de prolongar a vida útil dos pneus. Atualmente, com o avanço da eletrônica, esse sistema se tornou mais completo e mais seguro, além de ter se tornado um item obrigatório para carros de passeio. Este trabalho, tem como objetivo desenvolver um módulo eletrônico ABS, utilizando um microcontrolador para leitura e análise dos sensores de velocidade do carro e das rodas. O projeto de *firmware* e o *hardware* tem por objetivo a aplicação em um protótipo do tipo fórmula, da equipe EESC-USP Formula SAE e, portanto, foram desenvolvidos pensando na compatibilidade com o carro. A partir de testes realizados em bancada e no próprio protótipo da equipe, foram obtidos resultados satisfatórios para as leituras e análises dos sensores, garantindo a eficiência do sistema. O sinal de saída gerado pelo microcontrolador para acionar o sistema ABS também teve resultado satisfatório.

Palavras-chave: Microcontrolador. Freio. Sistema antibloqueio de freio. ABS. Eletrônica Embarcada. *Hardware*. Formula SAE.

ABSTRACT

JULIÃO, D. C. **Feasibility study of an anti-lock brake system applied to a prototype of Formula SAE.** 2017. 67p. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017.

The first ABS system was developed in 1920. Initially designed for airplanes, the system guaranteed a greater braking efficiency and preserved the tires. Nowadays, with the advancement of electronics, the ABS system has become more complete and more secure. This thesis aims to develop an electronic ABS module, using a microcontroller for reading and analyzing car speed sensors and wheel speed sensors. The firmware design and the hardware are intended to be applied to a Formula-type prototype of the EESC-USP Formula SAE, and therefore were developed with car compatibility in mind. Bench tests and tracks tests on the team's prototype provided a satisfactory result for the readings and analysis of the sensors, guaranteeing the efficiency of the system. The output signal generated by the microcontroller to activate an ABS system also had satisfactory result.

Keywords: Microcontroler. Brakes. Antiblocking system. ABS. Embeeded electronic. Hardware. Formula SAE.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Exemplo de frenagem com ABS	28
Figura 2 – Exemplo de um carro da categoria Formula SAE	31
Figura 3 – Exemplo de freio a tambor	33
Figura 4 – Exemplo de freio a disco	34
Figura 5 – Modelo de multiplicação de força em um braço de alavanca	35
Figura 6 – Modelo de aplicação de força no pedal de freio	36
Figura 7 – Exemplo de aplicação do Princípio de Pascal	37
Figura 8 – Gráfico da força de atrito	38
Figura 9 – Sensor de freio utilizado	41
Figura 10 – Funcionamento do sensor indutivo	42
Figura 11 – Sensor indutivo utilizado	42
Figura 12 – Roda Dentada	43
Figura 13 – Estrutura do Barramento CAN	44
Figura 14 – Circuito de entrada dos sinais analógicos	46
Figura 15 – Circuito de proteção para entradas digitais	46
Figura 16 – Circuito do MCP2551 e comunicação com o PIC	47
Figura 17 – Esquemático do PIC	48
Figura 18 – <i>Log</i> da Velocidade das Rodas	56
Figura 19 – <i>Log</i> Comparativo das Velocidades Aquisitadas	56
Figura 20 – <i>Log</i> Máxima Pressão de Freio	57
Figura 21 – <i>Log</i> Distribuição da Pressão das Linhas Freio	58
Figura 22 – <i>Log</i> Sinal de saída para controle do ABS	59
Figura 23 – <i>Especificações Técnicas do Microcontrolador Microchip PIC18f2680</i>	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Validação da velocidade da roda	55
Tabela 2 – Validação das Leituras Analógicas	57

LISTA DE CÓDIGOS

Código 1	Inicialização dos <i>Timers</i>	49
Código 2	Declaração dos <i>Timers</i>	50
Código 3	Declaração da interrupção	50
Código 4	Descrição das interrupções externas	51
Código 5	Descrição da função para calcular velocidade das rodas	53
Código 6	Exemplo de configuração da leitura analógica	54

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABS	<i>Anti-Lock Breaking System</i>
AFU	<i>Aide au Freinage d'Urgence</i>
BAS	<i>Brake Assist System</i>
CAN	<i>Controller Area Network</i>
CKP	<i>Crankshaft Position</i>
EBD	<i>Electronic Brake Distribution</i>
ECU	<i>Engine Control Unit</i>
EESC	Escola de Engenharia de São Carlos
FPGA	<i>Field-Programmable Gate Array</i>
GPS	<i>Global Position System</i>
IDE	<i>Integrated Development Environment</i>
LED	<i>Light Emitting Diode</i>
PCB	<i>Printed Circuit Board</i>
PLL	<i>Phase Locked Loop</i>
SAE	<i>Society of Automotive Engineers</i>
TPS	<i>Throttle Position Sensor</i>
USP	Universidade de São Paulo

LISTA DE SÍMBOLOS

Δ	Letra grega Delta - Símbolo matemático para representar diferença
ΔS	Diferença de espaço (Distância)
μ	Letra grega Mi - Coeficiente de atrito
μ_e	Coeficiente de atrito estático
μ_c	Coeficiente de atrito cinético
π	Letra grega Pi - Proporção numérica entre o perímetro de uma circunferência e seu diâmetro
Ω	Letra grega Ômega - Ohms, unidade de medida de resistência

SUMÁRIO

	Lista de Códigos	19
1	INTRODUÇÃO	27
1.1	Apresentação	27
1.2	Motivação e Objetivos	27
1.3	Estrutura deste Documento	29
2	EMBASAMENTO TEÓRICO	31
2.1	Fórmula SAE	31
2.2	Histórico dos Freios Automotivos	32
2.3	Tipos de Freio	32
2.3.1	Freio a Tambor	33
2.3.2	Freio a Disco	33
2.4	Mecânica dos Freios	34
2.4.1	Braço de Alavanca	35
2.4.2	Princípio de Pascal	36
2.4.3	Forças de Atrito	37
2.4.3.1	Força de Atrito Estático	38
2.4.3.2	Força de Atrito Cinético	38
2.4.4	Distância de Frenagem	39
2.5	Evolução dos Freios ABS	40
2.6	Sensores	40
2.6.1	Pressão de freio	41
2.6.2	Velocidade das rodas	41
2.6.3	Velocidade do carro	43
2.7	Barramento CAN	43
3	DESENVOLVIMENTO	45
3.1	Hardware	45
3.1.1	Microcontrolador	45
3.1.2	Periféricos	45
3.1.2.1	Entradas Analógicas	45
3.1.2.2	Entradas Digitais	46
3.1.2.3	Interrupções	47
3.1.2.4	<i>Controller Area Network - CAN</i>	47
3.1.3	Arquitetura da PCB	48

3.2	<i>Firmware</i>	49
3.2.1	<i>Timer</i>	49
3.2.2	Interrupção Externa	50
3.2.3	Cálculo das Velocidades das Rodas	51
3.2.4	Leituras Analógicas	53
4	TESTES, RESULTADOS E DISCUSSÕES	55
4.1	Velocidade das rodas	55
4.1.1	Teste em Bancada	55
4.1.2	Validação no protótipo	56
4.2	Pressão de Freio	56
4.2.1	Teste em Bancada	56
4.2.2	Validação no protótipo	57
4.3	Acionamento ABS	58
4.3.1	Teste em Bancada	58
5	CONCLUSÃO	61
5.1	Trabalhos futuros	61
	REFERÊNCIAS	63
	ANEXOS	65
	ANEXO A – ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DO MICROCONTRO- LADOR	67

1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo, encontram-se a apresentação do trabalho e as motivações e objetivos de sua realização.

1.1 Apresentação

Este trabalho, tem por objetivo o desenvolvimento de um módulo eletrônico para controle antibloqueio de freios, com o intuito de ser utilizado nos futuros protótipos da equipe EESC-USP Formula SAE.

O módulo eletrônico será responsável por adquirir velocidades das rodas e do carro, monitorar as pressões do freio, além de funcionar como controle do sistema responsável pelo alívio de pressão das linhas de freio.

Com o desenvolvimento desse módulo, os pilotos terão melhor dirigibilidade e maior controle do carro, garantindo também uma menor distância de frenagem, contribuindo com a segurança do piloto e protótipo e em um melhor desempenho em pista.

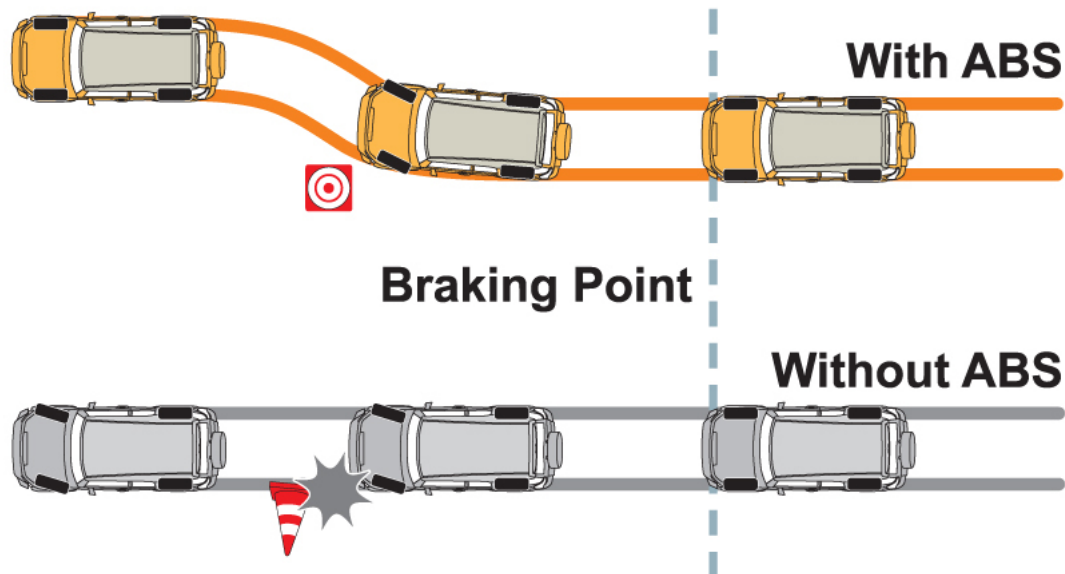
1.2 Motivação e Objetivos

O automóvel é o principal meio de transporte utilizado no mundo, sobretudo no Brasil, com uma média de um automóvel para cada quatro pessoas. Justamente por ser o meio de transporte mais utilizado, também é o que registra o maior número de acidentes. Sistemas de controle que auxiliam o motorista, garantindo maior dirigibilidade e segurança para os passageiros do carro, tornaram-se essenciais e projetos de lei já obrigam a presença desses equipamentos nos novos carros produzidos.

O sistema ABS ('Anti-lock Braking System' - Sistema Antibloqueio de Freios), especificamente, é responsável por evitar o travamento das rodas durante uma frenagem forte, trabalhando no limiar entre as forças de atrito estática e dinâmica, garantindo uma menor distância de frenagem e permitindo um maior controle do carro.

Na [Figura 1](#) está representado um exemplo em que um carro sem ABS, ao travar as rodas, não consegue desviar de um objeto, pois o carro passa a deslizar, mesmo com as rodas esterçadas. Por outro lado, no carro com o sistema ABS, ao impedir as rodas de ficarem travadas, o carro volta a ter tração e consegue realizar a manobra, evitando o acidente.

Figura 1: Exemplo de frenagem com ABS



Fonte: *Carros in foco*. 2017. Disponível em <http://www.carrosinfoco.com.br/carros/2016/09/funcionamento-e-detalhes-dos-freios-anti-bloqueio-abs/>

Para carros de corrida, os pilotos profissionais possuem habilidades e são treinados para frear com a máxima eficiência possível. No contexto da formula SAE, considerando que os pilotos não são profissionais, o sistema ABS promoverá ganhos de desempenho, podendo reduzir tempos de volta e garantindo uma maior segurança aos alunos durante testes e competições.

Sistemas ABS modernos, trabalham em conjunto com diversos sensores do carro, como posição do volante, velocidade das rodas e acelerômetros. Dessa forma, os módulos eletrônicos são capazes de identificar diferentes situações de risco, controlando independentemente cada roda, para que o motorista tenha o maior controle possível do carro a todo momento.

Visando melhorar o desempenho do protótipo da EESC USP Formula SAE, o objetivo deste trabalho é o desenvolvimento um módulo eletrônico para o monitoramento das velocidades das rodas, pressão das linhas de freio e controle antibloqueio de freios. Conectado ao barramento CAN (*Controller Area Network*) do protótipo, o módulo é capaz de se comunicar com os outros módulos eletrônicos, podendo enviar e receber informações.

O resultado da comparação entre velocidade do carro com a velocidade das rodas, é o *trigger* responsável pelo acionamento do sistema ABS e o sensor de pressão das linhas

de freio é utilizado para validar o seu funcionamento. Como o projeto de freio do protótipo desenvolvido pela equipe possui duas linhas de freio, sendo uma para as rodas dianteiras e outra para as rodas traseiras, ao identificar uma das rodas travadas, o sistema libera a pressão para as duas rodas do mesmo eixo.

Para acompanhar o funcionamento desses componentes, será utilizada a própria interface de telemetria desenvolvida pela equipe, que monitora o carro em tempo real, durante os testes e competições, além de permitir salvar *logs* da telemetria, para que os dados sejam analisados posteriormente.

1.3 Estrutura deste Documento

Este documento é dividido nas seguintes seções: introdução, que lista os objetivos deste projeto e as motivações que levaram ao seu desenvolvimento; embasamento teórico, para familiarizar o leitor com os conceitos fundamentais para a compreensão do projeto, escolha de componentes e como foi feita sua implementação; testes, resultados e discussões, onde o projeto é detalhado, com resultados analisados e discutidos; por fim, é feita uma conclusão, retomando tudo o que foi feito neste projeto.

2 EMBASAMENTO TEÓRICO

Neste capítulo serão apresentados os conceitos necessários para o entendimento do projeto.

2.1 Fórmula SAE

A Formula SAE, é uma categoria de competição estudantil organizada pela *Society of Automotive Engineers* (SAE), na qual estudantes das universidades devem projetar, construir, testar e correr com um protótipo no estilo fórmula. Na [Figura 2](#) está apresentado o carro da equipe EESC USP Formula SAE, que será utilizado para o estudo deste projeto.

Figura 2: Exemplo de um carro da categoria Formula SAE



Fonte: Autor

Atualmente presente em mais de dez países, a competição de Formula SAE tem por objetivo estimular os alunos à aplicarem na prática as teorias estudadas durante a faculdade, além de aproximar os estudantes do mundo profissional do automobilismo. Para isso, a competição é dividida em provas estáticas e dinâmicas, totalizando 1000 pontos. A equipe com maior pontuação, é considerada a campeã da competição.

São três provas estáticas: *Engineering Design*, no qual juízes da área automotiva avaliam as decisões de projeto e conhecimentos envolvidos no desenvolvimento do protótipo;

Presentation, na qual os alunos devem criar um plano de negócios realista e convencer os juízes de que esse seria um bom investimento; Por fim, a prova de Custos e Manufatura, que avalia o custo e a manufaturabilidade do protótipo desenvolvido ao longo do ano.

As provas dinâmicas são divididas em quatro eventos: Aceleração, na qual o carro deve percorrer uma distância de 75 metros no menor tempo; *Skid-Pad*, uma prova em um circuito em formato de oito, para avaliar a aceleração lateral do carro; *Autocross*, uma volta rápida no circuito; Enduro, em que o carro deve percorrer um total de 22km, sem que ocorra quebra. Junto com a prova de enduro, ocorre a prova de eficiência energética, uma relação entre consumo de combustível e tempo de volta.

2.2 Histórico dos Freios Automotivos

Dentro da indústria automotiva, os primeiros freios tiveram origem no sistema presente nas carruagens do século XVIII, composto por uma alavanca e uma sapata, que atuava diretamente nos pneus.

A partir de 1900, surgiram os primeiros sistemas hidráulicos, os freios a tambor, que promoveram uma maior eficiência, já que os carros alcançaram maiores velocidades. Partindo do princípio de que a compressibilidade dos líquidos é muito baixa, a pressão aplicada no pedal de freio é transmitida uniformemente pelas linhas de freio, acionando os sistemas presentes nas rodas do veículo.

Somente nas décadas de 1950 e 1960, os então freios a tambor começaram a ser substituídos nas linhas de produção pelos freios a disco, que possuem uma maior eficiência térmica, garantindo maior segurança aos passageiros. A partir de 1960, o sistema de freios sofreu evoluções mecânicas, principalmente no material utilizado para pastilhas e discos de freio.

No entanto, a grande evolução dos sistemas de freio, ocorreu entre os anos 1970 e 1990, quando a eletrônica passou a fazer parte dos freios automotivos. Além do sistema ABS, diversos outros sistemas eletrônicos também foram incorporados, como EBD (*Electronic Brake Distribution*), BAS (*Brake Assist System*) e AFU (*Aide au Freinage d'Urgence - Assistente de Frenagem de Emergência*).

2.3 Tipos de Freio

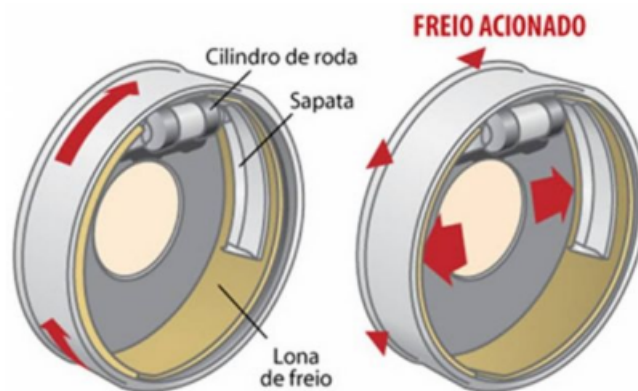
Para os sistemas hidráulicos, existem dois diferentes tipos de freios, presentes na maioria dos automóveis até hoje: tambor e a disco, sendo que, para os dois sistemas, é possível a utilização de um sistema eletrônico ABS.

2.3.1 Freio a Tambor

O freio a tambor é composto por um tambor e, dentro dele, há sapatas semicirculares com lonas fixas. O tambor está ligado à roda e gira com ela. Quando o pedal do freio é acionado, um pistão empurra as lonas contra o tambor, produzindo atrito e diminuindo a velocidade de giro do tambor e, conseqüentemente, da roda.

Na [Figura 3](#), está representado um exemplo do sistema de freio a tambor, utilizado nos automóveis.

Figura 3: Exemplo de freio a tambor



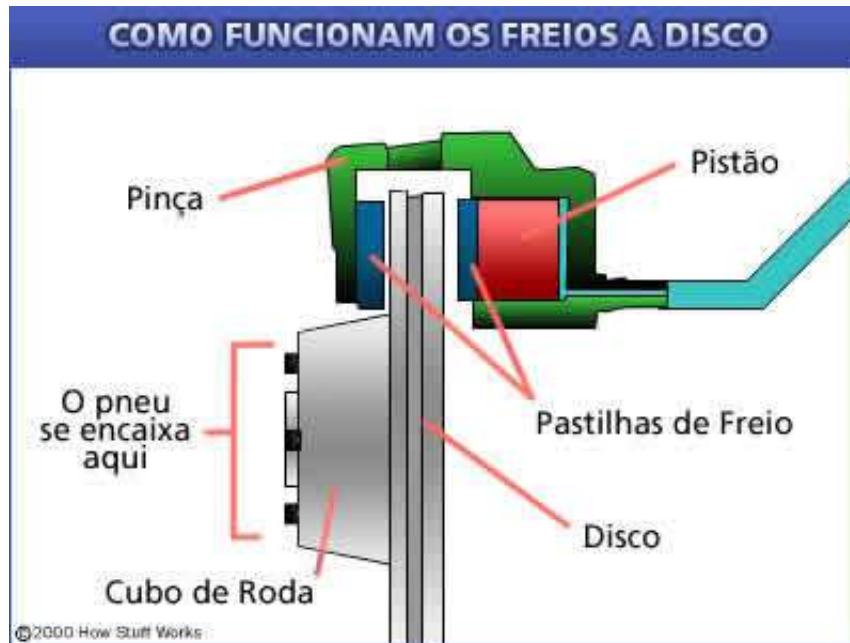
Fonte: Salão do carro. 2017. Disponível em <https://salaodocarro.com.br/como-funciona/freios-a-tambor.html>

Freios a tambor possuem algumas vantagens em relação ao freio a disco, como uma maior simplicidade do sistema, custo de produção menor e uma maior área de contato, gerando uma maior força de atrito para reduzir a velocidade do carro. Por outro lado, possui problemas de acúmulo de sujeira dentro do tambor, maior dificuldade de manutenção, além de problemas com resfriamento e dilatação térmica do tambor, que diminuem sua eficiência, tornando o curso do pedal mais longo em frenagens prolongadas.

2.3.2 Freio a Disco

O freio a disco é um sistema de freio mais complexo, que conta com um disco de freio preso ao cubo da roda, pinças e pastilhas de freio, conforme visto na [Figura 4](#). As pastilhas de freio são montadas dentro das pinças, e quando o pedal do freio é acionado, a pressão faz com que as pinças se fechem em torno do disco, e o atrito entre disco e pinça faz com que a velocidade do carro diminua.

Figura 4: Exemplo de freio a disco



Fonte: *How Stuff Works*. 2017. Disponível em <https://auto.howstuffworks.com/auto-parts/brakes/brake-types/disc-brake2.htm>

Sistemas de freio a disco foram desenvolvidos como uma evolução do freio a tambor, resolvendo problemas de dissipação de energia, acúmulo de sujeira, além de uma melhor distribuição da pressão aplicada ao disco de freio, o que garante um menor desgaste das pastilhas, quando comparadas com as sapatas do sistema a tambor.

Para manutenção, o acesso aos componentes do freio a disco é muito mais fácil, assim como a substituição das pastilhas e discos de freio, quando comparadas às sapatas e lonas do freio a tambor.

Devido ao efeito de transferência de carga, carros de passeio utilizam freios a disco nas rodas dianteiras, onde é necessário um maior esforço de frenagem, e freios a tambor nas rodas traseiras, que são menos requisitados, podendo utilizar um sistema de baixo custo.

2.4 Mecânica dos Freios

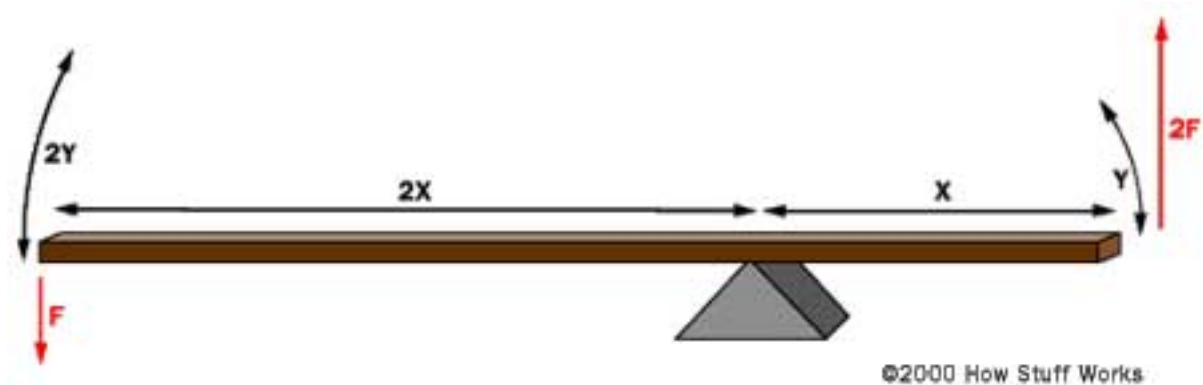
Para entender o funcionamento de um sistema de freio automotivo, é preciso ter conhecimento de alguns conceitos físicos que explicam como a força aplicada pela perna do motorista atua no sistema e é capaz de parar um carro, muitas vezes mais pesado.

2.4.1 Braço de Alavanca

O primeiro componente do sistema de freio é o pedal de freio, que transfere e multiplica a força aplicada pelo motorista. Seu funcionamento é baseado em um braço de alavanca. Ao aplicar uma força \vec{F} na base do pedal, o braço de alavanca rotaciona em um pivô, fazendo com que uma haste pressione o cilindro mestre. A relação das distâncias entre o ponto em que a força é aplicada para o ponto de pivotamento, e o ponto de fixação da haste até o ponto de fixação do pedal, é responsável por multiplicar a força \vec{F} , além de determinar o curso do pedal.

Podemos ver a seguir, na [Figura 5](#), um exemplo em que uma força \vec{F} , tem seu módulo multiplicado por 2, devido às distâncias ao ponto de pivotamento.

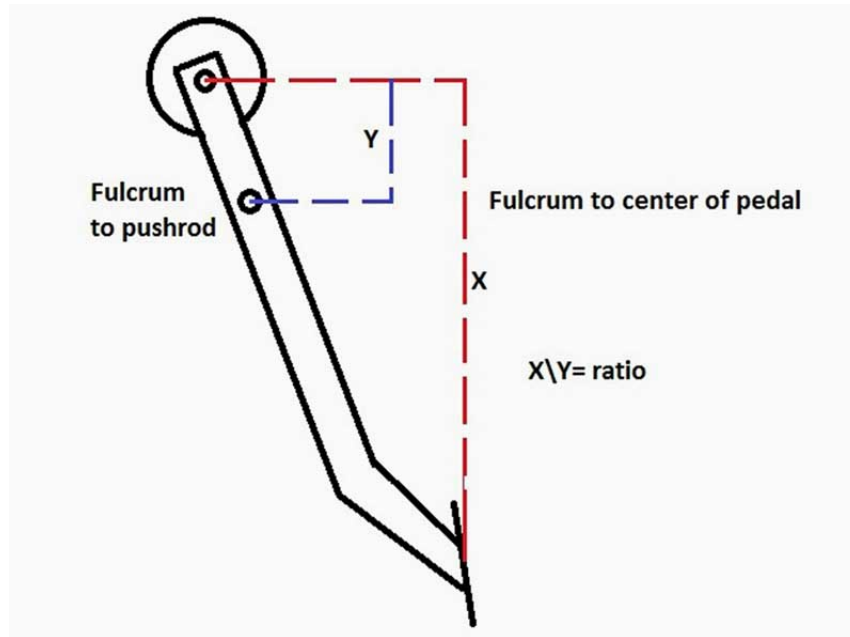
Figura 5: Modelo de multiplicação de força em um braço de alavanca



Fonte: *How Stuff Works*. 2017. Disponível em <https://auto.howstuffworks.com/auto-parts/brakes/brake-types/brake1.htm>

Na figura [Figura 6](#) podemos ver o mesmo exemplo aplicado para o pedal de freio, sendo a relação X/Y responsável por determinar a força transferida para o cilindro mestre e o curso do pedal de freio.

Figura 6: Modelo de aplicação de força no pedal de freio



Fonte: Carros in foco. 2017. Disponível em <http://www.carrosinfoco.com.br/carros/2016/02/sistema-de-freios-automotivos/>

2.4.2 Princípio de Pascal

Além de transmitir a força do pedal para as pinças e tambores de freio, o sistema hidráulico também realiza a função de multiplicar a força aplicada através do Princípio de Pascal, o mesmo utilizado em elevadores hidráulicos. O Teorema de Pascal diz que a pressão aplicada em um recipiente fechado é transmitida a todas as partes igualmente. Definimos pressão por força aplicada à uma superfície:

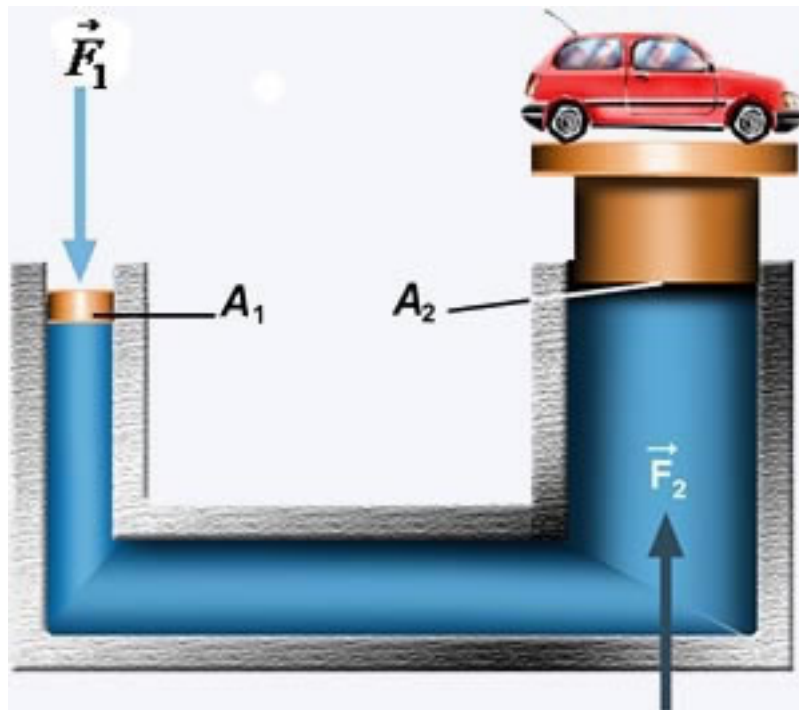
$$P = \frac{F}{A} \quad (1)$$

Como a área de contato do pistão das pinças de freio é maior que a área do cilindro mestre, onde a força é aplicada, e partindo do princípio de que a pressão se mantém constante em todo o sistema, a força inicialmente aplicada no cilindro mestre, é multiplicada no ponto de contato com os discos de freio.

$$\frac{\vec{F}_1}{A_1} = \frac{\vec{F}_2}{A_2} \quad (2)$$

Na Figura 7 temos um exemplo da aplicação do Princípio de Pascal, onde uma pequena força \vec{F}_1 aplicada sobre uma área pequena A_1 , é amplificada para uma força \vec{F}_2 sobre uma área maior A_2 .

Figura 7: Exemplo de aplicação do Princípio de Pascal



Fonte: Brasil Escola. 2017. Disponível em <http://brasilecola.uol.com.br/fisica/principio-de-pascal.htm>

2.4.3 Forças de Atrito

Entender como as forças de atrito atuam em um carro é essencial para compreender tanto como ele se movimenta, quanto como ocorre o processo de frenagem. Ao entrar em movimento, todo corpo acumula energia cinética, que é proporcional à sua massa e sua velocidade.

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2 \quad (3)$$

Quando os freios entram em ação, a velocidade do carro diminui convertendo parte de sua energia cinética em energia térmica, através da força de atrito entre discos e pastilhas de freio, que é dissipada na forma de calor. Como a energia cinética é menor e a massa do carro permanece inalterada, temos uma diminuição da velocidade do veículo. A equação da força de atrito é descrita por:

$$F_{at} = \mu \vec{N} \quad (4)$$

onde \vec{N} é a força normal, e μ é o coeficiente de atrito, que pode ser dividido em coeficiente estático (μ_e) e coeficiente cinético (μ_c).

2.4.3.1 Força de Atrito Estático

A força de atrito estático é a força que se opõe ao início do movimento de um objeto. Para o caso de um carro, é a força entre os pneus e a superfície do asfalto contrária ao movimento do carro, antes que o pneu comece a deslizar. Uma característica da força de atrito estático é que ela aumenta constantemente, até atingir seu ponto máximo, quando o corpo está na iminência de entrar em movimento.

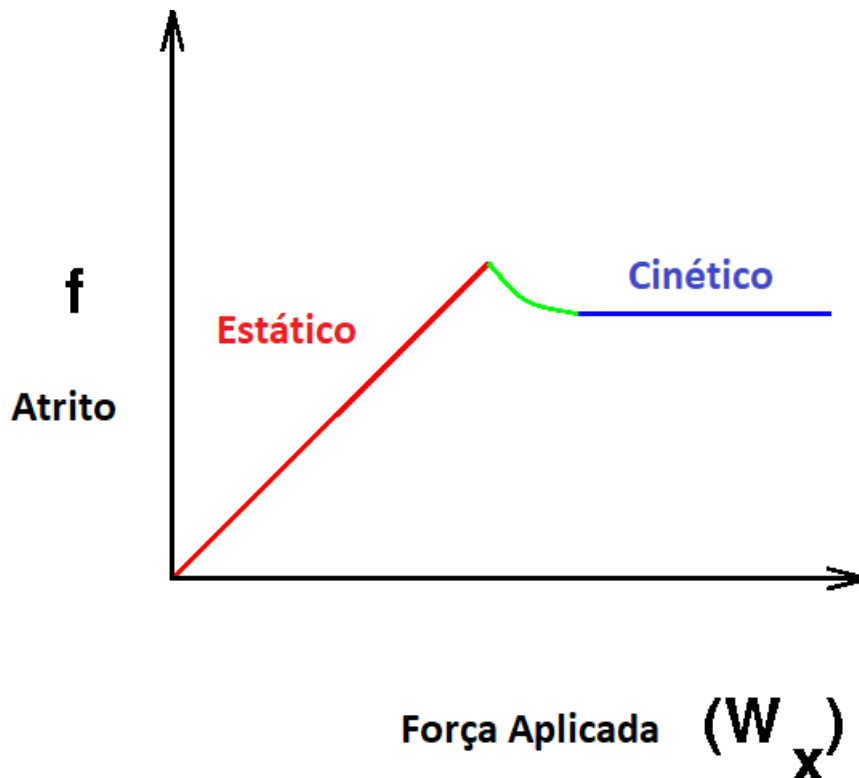
2.4.3.2 Força de Atrito Cinético

A força de atrito cinético é a força que se opõe ao movimento de um corpo somente enquanto ele estiver em movimento. Para o caso de um carro em movimento, o atrito cinético é a força contrária à direção de movimento do carro, aplicada aos pneus, quando estes estão deslizando (travados). Os coeficientes de atrito estático e cinético são diferentes e, por isso, é mais fácil manter um corpo em movimento, do que tirá-lo do estado de repouso:

$$\mu_c < \mu_e \quad (5)$$

O gráfico representativo das forças de atrito pode ser visto na [Figura 8](#).

Figura 8: Gráfico da força de atrito



2.4.4 Distância de Frenagem

Por causa da diferença entre as forças de atrito estático e cinético, pode-se dizer que a distância necessária para realizar uma frenagem completa de um carro será menor, se o freio trabalhar com a força de atrito estático máximo, impedindo que os pneus do carro travem. Essa é a função dos chamados freios ABS. Para calcular a distância de frenagem, serão consideradas as equações da força de atrito, de Torricelli e a segunda Lei de Newton.

Pela segunda Lei de Newton, a força resultante é:

$$\vec{F} = m\vec{a} \quad (6)$$

Considerando uma frenagem em uma superfície plana, a força resultante que atua no carro é a força de atrito e, portanto, a Normal é igual ao peso do carro:

$$\begin{aligned} \mu\vec{N} &= m\vec{a} \\ \mu m\vec{g} &= m\vec{a} \\ \mu\vec{g} &= \vec{a} \end{aligned} \quad (7)$$

onde \vec{g} é a aceleração da gravidade.

Considerando agora a equação de Torricelli, para uma velocidade final 0 (zero) e aceleração negativa, uma vez que o carro está em regime de desaceleração:

$$\begin{aligned} \vec{V}^2 &= \vec{V}_0^2 + 2\vec{a}\Delta S \\ 2\vec{a}\Delta S &= \vec{V}_0^2 \end{aligned} \quad (8)$$

Substituindo a aceleração obtida da segunda Lei de Newton na equação resultante de Torricelli:

$$\begin{aligned} 2\mu\vec{g}\Delta S &= \vec{V}_0^2 \\ \Delta S &= \frac{\vec{V}_0^2}{2\mu\vec{g}} \end{aligned} \quad (9)$$

Analisando a [Equação 9](#), uma vez que a aceleração da gravidade é constante, quanto maior o coeficiente de atrito, menor será a distância de frenagem. Dessa forma, a eficiência do sistema de freio ABS é garantida, pois o sistema trabalha no limiar da força de atrito estático, não permitindo que as rodas travem e deslizem, entrando em regime de atrito cinético.

2.5 Evolução dos Freios ABS

Inicialmente desenvolvido para aviões, o primeiro sistema ABS foi inventado na década de 1920, pelo francês Gabriel Voisin. O projeto inicial era composto por um volante e uma válvula, ligados a linha hidráulica dos freios. Na época, foi verificada uma melhora de 30% na performance de frenagem dos aviões, além de diminuir os danos aos pneus, evitando queima e explosões resultantes do atrito na derrapagem.

Em 1950, o sistema de modulação da pressão de freio era bem difundido na aviação inglesa, sendo utilizado por diversos modelos. No ano de 1958, devido ao grande número de acidentes com motocicletas originados em derrapagens, o Road Research Laboratory fez o primeiro teste de um sistema ABS em motocicletas. Para as motocicletas, também foi verificado uma melhora de 30% na eficiência de frenagem.

Na década de 1960, o sistema ABS mecânico estava no limite da sua tecnologia, mas ainda contava com uma baixa confiabilidade, até que um sistema completamente eletrônico foi desenvolvido para uma aeronave Concorde. Com a nova tecnologia, diversas montadoras começaram a desenvolver seus próprios sistemas eletrônicos de freio durante os anos 1970 e 1980. Entre elas, destacaram-se a Toyota, Mercedes-Benz e Chrysler.

O modelo eletrônico funciona com base no comparativo entre as velocidades das rodas e do veículo. Ao identificar que a velocidade da roda é zero, mas o veículo continua em movimento, pode-se afirmar que as rodas estão travadas e deslizando. Nesse momento, o módulo ABS entra em ação. Através de uma bomba e de válvulas de retorno, o fluido da linha é bombeado de volta para o cilindro mestre, aliviando a pressão das pinças de freio, fazendo com que as rodas voltem a girar. Esse retorno do fluido ao cilindro mestre é o que cria a "trepidação" no pedal, sentida pelo motorista.

Nos carros modernos, os módulos ABS atuam independentemente em cada roda e, sua função, deixou de ser apenas reduzir a distância de frenagem, para garantir um maior controle do carro em condições adversas. Com a atuação independente, é possível auxiliar o motorista a realizar curvas para desviar de objetos, mantendo as rodas travadas de um mesmo lado, ou até mesmo evitar que o carro rode, caso alguma roda passe sobre uma superfície com menos atrito.

2.6 Sensores

Os sensores possuem um papel fundamental para o controle e monitoramento de um sistema eletrônico embarcado, transformando grandezas físicas em sinais elétricos. Para o funcionamento do ABS foram utilizados sensores de velocidade do carro, velocidade das rodas e pressão das linhas de freio.

2.6.1 Pressão de freio

A escolha do sensor de pressão de freio está diretamente ligada ao projeto do sistema de freios do protótipo da EESC-USP Formula SAE. Sabendo que a pressão de freio foi dimensionada para até 4MPa, foi escolhido o sensor 112CP da Sensata, que é capaz de trabalhar com leituras até 4,4MPa, além de ser integrado a um sensor de temperatura, que poderá ser utilizado em projetos futuros. Na [Figura 9](#) está representado o sensor utilizado.

Figura 9: Sensor de freio utilizado



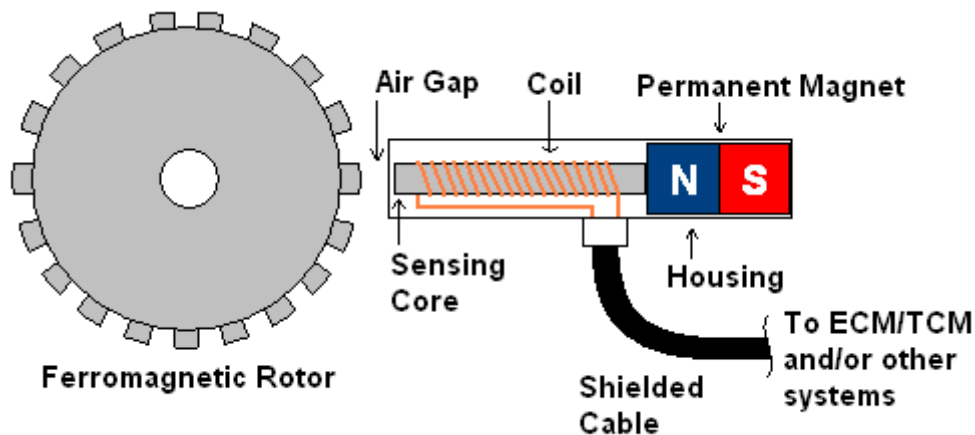
Fonte: Sensata. 2017. Disponível em <http://www.sensata.com/sensors/pressure-sensor-hvac-112cp.htm>

O uso do sensor de pressão das linhas de freio, é fundamental para validação do sistema do carro, para localizar rapidamente qualquer problema, como um vazamento e para validar o funcionamento do sistema ABS. leitura do sensor de pressão será feita através de uma das entradas analógicas, que está explicada mais adiante.

2.6.2 Velocidade das rodas

Para o cálculo da velocidade das rodas, foi utilizado um sensor indutivo. Sensores indutivos são compostos por um núcleo ferromagnético e um ímã, envoltos em uma bobina, conforme a [Figura 10](#).

Figura 10: Funcionamento do sensor indutivo



Fonte: Carros in foco. 2017. Disponível em <http://www.carrosinfoco.com.br/carros/2016/09/funcionamento-e-detalhes-dos-freios-anti-bloqueio-abs>

Dessa forma, ao se aproximar de um material ferromagnético, o fluxo do campo magnético da bobina varia, causando uma tensão na bobina do sensor. O sensor de velocidade da roda utilizado é o modelo I8-1-DNA-K8 da Metaltex, conforme visto na Figura 11.

Figura 11: Sensor indutivo utilizado



Fonte: Metaltex. 2017. Disponível em <http://www.metaltex.com.br/editor/images/produtos/i12-4-dnc.jpg>

Para realizar a leitura, uma roda dentada foi presa ao cubo da roda do protótipo de Fórmula SAE, conforme Figura 12. Ao girar junto com a roda, o sensor identifica a os dentes e calcula o tempo entre dois dentes consecutivos. Conhecendo o intervalo de tempo entre cada leitura e a distância angular entre cada dente, a velocidade da roda é calculada. A leitura da velocidade das rodas será feita através de uma interrupção externa, que será explicada mais adiante.

Figura 12: Roda Dentada



Fonte: Autor

2.6.3 Velocidade do carro

Para o cálculo da velocidade do carro, o sensor utilizado é o sensor CKP (*Crankshaft Position*), e o sensor de marcha, ambos originais do motor utilizado pelo protótipo da equipe EESC-USP Formula SAE. O sensor é do tipo indutivo, responsável pela leitura da rotação do motor.

O sinal gerado é enviado para a ECU (*Engine Control Unit*) utilizada pela equipe, a FT600, da Fuel Tech, que é responsável por realizar as contas. Para isso, alguns parâmetros de entrada são definidos, como as relações de cada marcha e a relação final do sistema de transmissão do carro.

Em posse do sinal do CKP, da marcha do carro e dos parâmetros configurados, a ECU calcula a velocidade do carro e fornece esse dado no barramento CAN, ao qual todos os módulos estão conectados. Dessa forma, o dado é coletado pelo módulo de controle do ABS e pode ser utilizado para comparação.

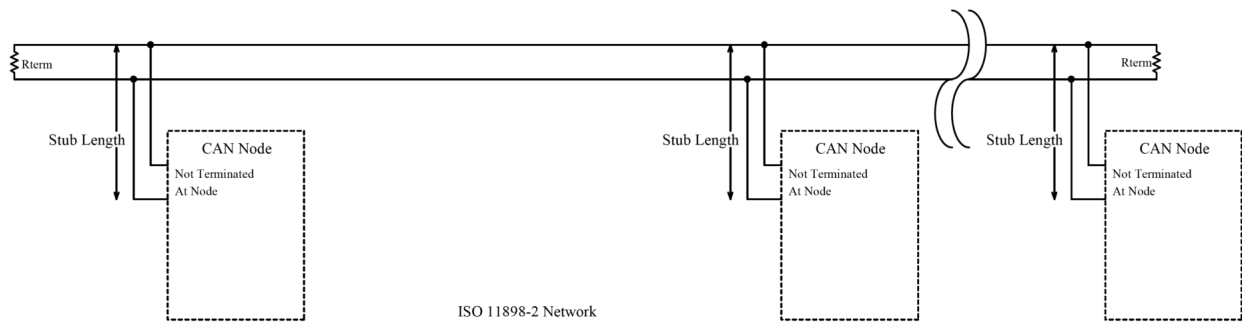
2.7 Barramento CAN

O meio de comunicação escolhido para ser utilizado entre os módulos foi o barramento CAN. Muito utilizado no meio automobilístico, essa rede tem quatro pilares

fundamentais, que são a implementação em *hardware*, uma boa imunidade à ruídos, tratamentos de erros e possui prioridade de mensagens, impedindo a ocorrência de uma interferência destrutiva entre os sinais.

Instalado junto com o chicote elétrico do carro, o barramento CAN é formado por um par trançado com duas terminações em resistores de 120Ω e todos os módulos estão conectados ao barramento como se fosse um varal. A figura [Figura 16](#) representa o modelo de uso do barramento, em que cada CAN Node, é um módulo eletrônico.

Figura 13: Estrutura do Barramento CAN



Fonte: Wikipedia. 2017. Disponível em https://en.wikipedia.org/wiki/CAN_bus

O barramento CAN utilizado no protótipo é baseado no protocolo SAE J1939, que possui biblioteca implementada pela própria fabricante do microcontrolador. Foi utilizado o padrão 2.0B, que possui um cabeçalho estendido.

3 DESENVOLVIMENTO

O desenvolvimento deste projeto foi dividido em duas partes: *hardware* e *firmware*. Como o intuito deste projeto é ser implementado no protótipo da EESC-USP Formula SAE, o projeto do *hardware* e do *firmware* foram implementados de forma a serem compatíveis com o atual sistema utilizado pela equipe.

3.1 Hardware

O projeto do *hardware* consiste na escolha da plataforma utilizada e no desenvolvimento de uma placa de circuito impresso, PCB (*Printed Circuit Board*). Para realizar o design da placa, foi utilizado o *software* Altium Designer tanto para o projeto do esquemático, como para o roteamento da PCB.

3.1.1 Microcontrolador

Para este projeto, optou-se por utilizar o microcontrolador PIC18f2680 da Microchip. Além de possuir todos os recursos necessários para o desenvolvimento, tem um baixo custo de mercado, em relação à outras plataformas, como FPGAs e conta com uma interface com rede CAN, que permite a comunicação com os diversos módulos eletrônicos presentes no protótipo de Formula SAE.

Também contribuiu para a escolha do microcontrolador a experiência e documentação presentes nos projetos anteriores da equipe EESC-USP Formula SAE, facilitando o desenvolvimento do projeto.

3.1.2 Periféricos

Os periféricos do microcontrolador utilizados estão listados abaixo, junto com seus circuitos de entrada e proteção.

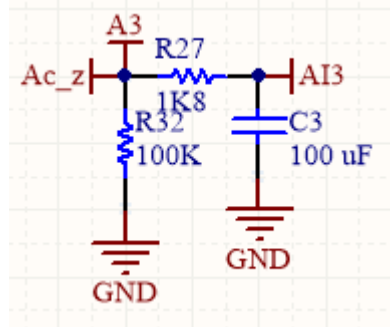
3.1.2.1 Entradas Analógicas

Entradas analógicas são utilizadas para sinais que variam continuamente no tempo e podem assumir infinitos valores dentro de uma faixa especificada. No entanto, para se trabalhar com esses sinais, é preciso transformar esses dados em valores digitais. Para isso, utiliza-se o conversor A/D interno presente no microcontrolador.

O PIC18f2680 conta com um conversor de 10bits, 7 canais e amostragem de 100kpsps. Trabalhando com uma tensão de referência de 5V, os sinais analógicos podem ser obtidos com uma precisão de 4,88mV/bit, o que é suficiente para os dados analógicos coletados.

Na [Figura 14](#) está representado o circuito de entrada para os sinais analógicos, associados a um filtro passa baixa, e um *pull-down* para manter em nível lógico baixo, quando não há sinal.

Figura 14: Circuito de entrada dos sinais analógicos



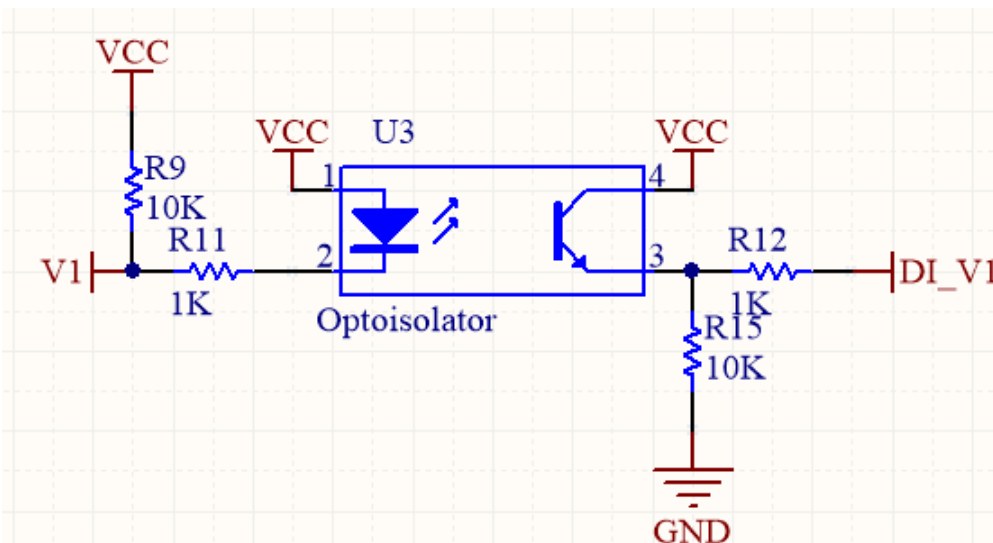
Fonte: Autor

3.1.2.2 Entradas Digitais

Entre os 28 pinos do microcontrolador, 24 podem ser utilizados como entradas e saídas digitais. A grande quantidade de portas digitais facilita o design e roteamento da PCB, uma vez que pode-se posicionar os componentes na placa, diminuindo as trilhas e reduzindo o tamanho da placa.

Cada porta digital deve ser considerada via *firmware* para trabalhar como uma porta de saída ou de entrada de sinais. Para todas as entradas digitais, é utilizado um circuito de proteção composto por um optoisolador, conforme visto na [Figura 15](#).

Figura 15: Circuito de proteção para entradas digitais



Fonte: Autor

O optoisolador funciona como um LED e um fotoreceptor, que ao receber luz, permite a passagem de tensão. Dessa forma, grandes valores de tensão aplicados a entrada digital não danificam o microcontrolador, uma vez que ele se encontra fisicamente isolado.

3.1.2.3 Interrupções

O microcontrolador escolhido possui três pinos que podem ser utilizados para interrupção externa. Uma interrupção faz com que a sequência natural do código seja interrompida, e uma rotina seja executada quando um sinal é detectado, retornando ao ponto interrompido após o final da rotina.

A interrupção externa é utilizada para a leitura do sinal de velocidade da roda. Como é um sinal adquirido em diferentes frequências e que deve ser interpretado no momento em que ocorre, a interrupção externa é a melhor solução.

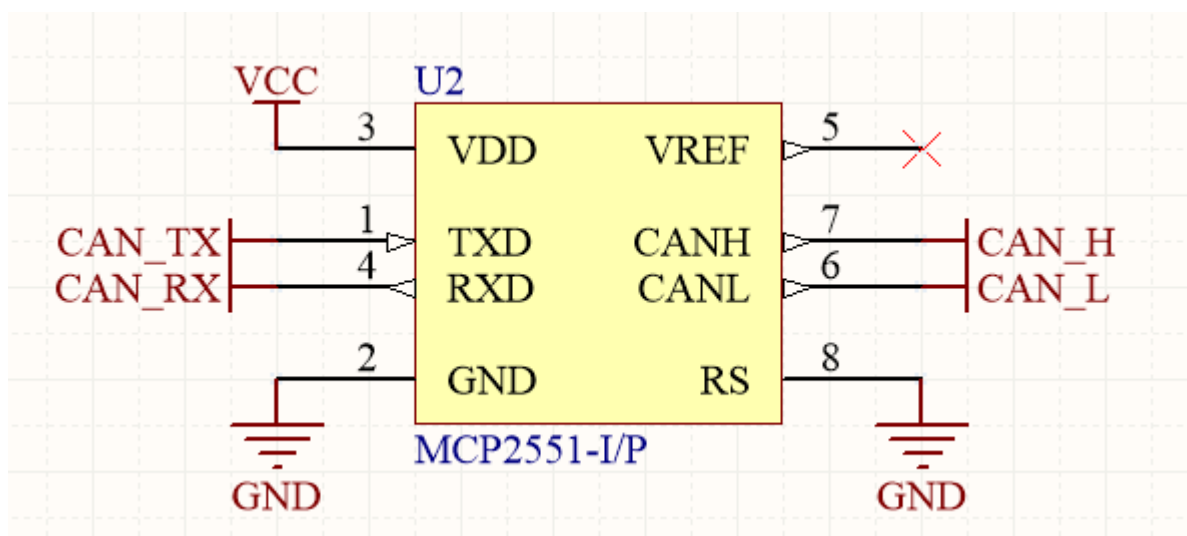
3.1.2.4 Controller Area Network - CAN

O protocolo CAN é amplamente utilizado na indústria automotiva, principalmente pela sua robustez e taxa de transmissão de até 1Mb/s. Este protocolo é utilizado na comunicação entre os módulos da EESC-USP Formula SAE e por isso também foi implementada a comunicação CAN neste projeto.

Para funcionar através de um par trançado diferencial, foi utilizado o MCP 2551 da Microchip para adequar os níveis de tensão.

Na [Figura 16](#) está representado o esquemático do MCP 2551.

Figura 16: Circuito do MCP2551 e comunicação com o PIC



Fonte: Autor

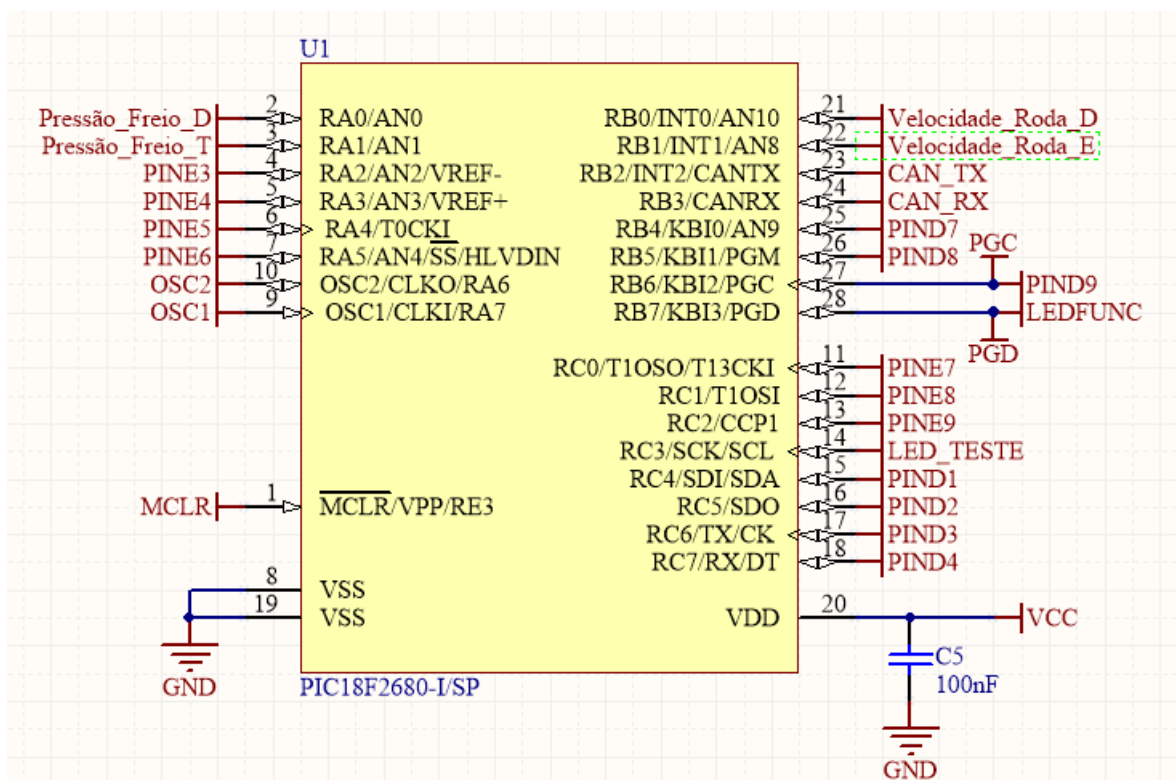
3.1.3 Arquitetura da PCB

A placa de circuito impresso foi desenvolvida no formato de *shield*, que está conectada a uma placa base. Essa, possui todos os circuitos comuns a todos os módulos eletrônicos do protótipo de Formula SAE, como microcontrolador, *transceiver* da rede CAN e o circuito regulador de tensão. Dessa forma, há uma padronização para o conector dos módulos, não existindo risco de estragar algum componente, caso o módulo seja conectado no local errado.

A *shield* desenvolvida possui os circuitos de entradas analógicas e digitais utilizadas para o projeto do ABS, além de circuitos para outros sensores, não abordados neste projeto. Assim, qualquer módulo desenvolvido que dependa apenas das entradas analógicas e digitais, pode utilizar a mesma PCB, modificando apenas o *firmware*.

Na Figura 17, está representado o esquemático do PIC 18f2680 e suas conexões, feito através do *software* Altium Designer 13.

Figura 17: Esquemático do PIC



Fonte: Autor

Após finalizar o esquemático de todos os componentes e suas conexões, foi realizado o roteamento da placa, utilizando o mesmo *software*. A fim de simplificar o roteamento e diminuir a quantidade de trilhas, foram utilizados dois planos com tensão de referência. A *top layer*, conectada ao VCC (5V) e a *bottom layer* conectada ao GND (terra). Dessa forma,

nenhuma trilha de alimentação é roteada, simplificando o *design*. Devido à conexão com a placa base, o tamanho da *shield* foi pré-definido e seus componentes foram posicionados com a finalidade de otimizar o espaço da placa.

Para facilitar o *debug*, dois LEDs foram colocados na placa, um aceso sempre que a PCB estiver energizada, e outro para ser utilizado em testes, como uma saída digital para as funções utilizadas.

3.2 Firmware

O projeto do *firmware* consiste no desenvolvimento de um código para analisar os sinais de entrada e gerar os respectivos sinais de saída esperados pelo sistema. Para isso, foi desenvolvido um código em C utilizando a interface MPLAB 8 IDE e o compilador C18, ambos distribuídos pela Microchip, fabricante do microcontrolador utilizado.

Todo o código foi dividido em três arquivos independentes: um arquivo de *header*, que possui todas as constantes utilizadas, cabeçalho de funções e declaração de variáveis. Um segundo arquivo, com a descrição de cada uma das funções implementadas. Por fim, o último arquivo é o arquivo principal, chamado de *main*, que contém a chamada das funções. Dessa forma, tem-se uma divisão mais limpa do código, facilitando o seu entendimento.

Os principais pontos do *firmware* desenvolvido estão descritos a seguir:

3.2.1 Timer

Foram utilizadas duas interrupções de *timer*. A função `Inicializa_Timer`, descrita no [Código 1](#) habilita e inicializa os dois contadores utilizados.

Código 1: Inicialização dos *Timers*

```

1 void Inicializa_Timer ()
2 {
3     // Configura Timer 0
4     OpenTimer0 (  TIMER_INT_ON &  //Liga interrupcao do timer
5                 T0_16BIT &      //Contador de 16bits – Conta até 65535
6                 T0_SOURCE_INT & //Fonte de \textit{clock} interna
7                 T0_EDGE_RISE &  //Conta pulso na descida do \textit{clock}
8                 T0_PS_1_32  ); //Prescale de 1:32
9     WriteTimer0 (TEMPO_TIMER_0);
10
11    // Configura Timer 1
12    OpenTimer1 (  TIMER_INT_ON &
13                T1_16BIT_RW &
14                T1_SOURCE_INT &

```

```

15     T1_PS_1_8 &
16     T1_OSC1EN_OFF &
17     T1_SYNC_EXT_OFF);
18 WriteTimer1 (TEMPO_TIMER_1);
19 }

```

O *Timer0* é utilizado para calcular o intervalo entre duas leituras do sensor de velocidade das rodas e é resetado ao maior tempo possível, a cada 1,68s. O *Timer1* é utilizado com estouro a cada 1ms, para incrementar contadores de tempo. Esses contadores são consultados na rotina principal, para que as funções sejam realizadas em intervalos definidos de tempo.

No [Código 2](#), estão descritas as duas interrupções de *timer*

Código 2: Declaração dos *Timers*

```

1 // Trata interrupção de TIMER0
2 if (INTCONbits.TMR0IF)
3 {
4     // Zera a flag de interrupção ( IF = INTERRUPT FLAG )
5     INTCONbits.TMR0IF = 0;
6     // Reinicia o timer com um valor que causará o estouro a cada
7     1,68s
8     WriteTimer0 (TEMPO_TIMER_0);
9 }
10 if (PIR1bits.TMR1IF)
11 {
12     PIR1bits.TMR1IF = 0;
13     // Reinicia o timer com um valor que causará o estouro a cada 1ms
14     WriteTimer1 (TEMPO_TIMER_1);
15
16     u16_contador_100++;
17     u16_contador_200++;
18 }

```

3.2.2 Interrupção Externa

A interrupção externa será utilizada para o cálculo da velocidade das rodas. Como a interrupção quebra a sequência lógica do código programado, o ideal é que sua rotina seja a mais sucinta possível, para que o microcontrolador retorne para a rotina principal.

No [Código 3](#) estão descritas as funções de interrupção externa, junto com o trecho que indica em qual posição da memória, o código da interrupção será escrito.

Código 3: Declaração da interrupção

```

1  void Inicializa_Interrupcao_Externa()
2  {
3      //Abre e configura a Interrupcao 0 para leitura da velocidade 1
4      OpenRB0INT ( PORTB_CHANGE_INT_ON &
5                  RISING_EDGE_INT &
6                  PORTB_PULLUPS_OFF );
7
8      //Abre e configura a Interrupcao 1 para leitura da velocidade 2
9      OpenRB1INT ( PORTB_CHANGE_INT_ON &
10                 RISING_EDGE_INT &
11                 PORTB_PULLUPS_OFF );
12     delay (DEL200ms);
13 }

```

No Código 4 está descrita a interrupção externa, utilizada para leitura das velocidades das rodas. Cada vez que o sensor indutivo detecta um dente da roda dentada, um sinal é enviado para a porta de interrupção externa do PIC. Ao receber esse sinal, o código da interrupção é executado, escrevendo em um vetor o valor de leitura do *Timer0*. Somente dois valores de tempo serão escritos, até que o cálculo da velocidade seja realizado pela rotina principal. Após isso, o vetor é zerado.

Código 4: Descrição das interrupções externas

```

1  // Interrupção externa int0 (velocidade 1)
2  if (INTCONbits.INT0IF)
3  {
4      INTCONbits.INT0IF = 0;
5
6      if (u08_dat_vel1_flag_leitura)
7      {
8          u16_dat_vel1_tempos[u08_aux_vel1_turno] = ReadTimer0();
9          u08_aux_vel1_turno++;
10
11         if (u08_aux_vel1_turno == 2)
12             u08_dat_vel1_flag_leitura = FALSE;
13     }
14 }

```

3.2.3 Cálculo das Velocidades das Rodas

O Código 5 descreve como é feito o cálculo da velocidade das rodas, e sua conversão para km/h. Para isso, é utilizada uma função que leva em conta o diâmetro do pneu do

carro, e o tempo de instrução do PIC.

A roda dentada utilizada pelo sensor possui oito dentes, de modo que entre duas leituras é percorrido um $\frac{1}{8}$ de volta. O pneu utilizado pelo protótipo tem um raio externo de 228,6mm. Dessa forma, considerando que não há deslizamento, para cada volta do pneu, o carro anda 1436,34mm para frente e, entre duas leituras seguidas, o carro percorre uma distancia de 179,54mm.

O cálculo do perímetro está demonstrado na [Equação 10](#):

$$\begin{aligned} P &= 2\pi r \\ P &= 2 \times 228,6mm \times 3,14 \\ P &= 1436,37mm \end{aligned} \tag{10}$$

Onde P é o perímetro externo do pneu. Assim, a distância ΔS percorrida entre duas leituras consecutivas é:

$$\begin{aligned} \Delta S &= \frac{P}{8} \\ \Delta S &= \frac{1436,37mm}{8} \\ \Delta S &= 179,54mm \end{aligned} \tag{11}$$

A unidade de tempo utilizada para o cálculo da velocidade entre as duas leituras, é referente ao ciclo de máquina do PIC. O tempo entre duas leituras seguidas(Δt), será o tempo de um ciclo de *timer* (t_{ciclo}), multiplicado pela quantidade de ciclos executados. Para o cálculo desse tempo, foi utilizada a frequência de operação (F_{ciclo}), conforme [Equação 12](#).

$$\begin{aligned} \Delta t &= n \times t_{ciclo} \\ \Delta t &= n \times \frac{1}{F_{ciclo}} \end{aligned} \tag{12}$$

Como foi apresentado no [Código 1](#), o *Timer0* foi inicializado com um *prescale* de 32. Dessa forma, apenas a cada 32 ciclos de máquina, o contador do *timer* é decrementado. No projeto foi utilizado um cristal de 10MHz como oscilador e o PIC foi programado com um PLL (*Phase Locked Loop*) que multiplica a frequência de oscilação por 4.

Como cada ciclo de máquina do PIC dura 4 pulsos de *clock*:

$$\begin{aligned} F_{ciclo} &= \frac{F_{osc} \times PLL}{4 \times prescale} \\ F_{ciclo} &= \frac{(10 \times 10^6)Hz \times 4}{32 \times 4} \end{aligned} \tag{13}$$

Substituindo os valores na [Equação 12](#) para o cálculo do tempo entre duas leituras:

$$\begin{aligned}\Delta t &= n \times t_{ciclo} \\ t_{ciclo} &= \frac{n \times 32}{10 \times 10^6} s \\ \Delta t &= n \times 0,0000032s\end{aligned}\tag{14}$$

Para calcular a velocidade da roda, convertendo a distância de milímetros para metros, temos:

$$\begin{aligned}V &= \frac{\Delta S}{\Delta t} \\ V &= \frac{179,54mm \times 10^{-3}}{n \times 0,0000032s} \\ V &= \frac{56106,25}{n} m/s\end{aligned}\tag{15}$$

Conforme pode ser visto no [Código 5](#), onde `CONSTANTE_CALC_VELOCIDADES` é o valor 56106,25 e `n` é a subtração das duas posições do vetor de tempo.

Código 5: Descrição da função para calcular velocidade das rodas

```

1 void Calcula_Velocidades()
2 {
3     if ( (u16_dat_vel1_tempos[1] - u16_dat_vel1_tempos[0]) != 0 )
4     {
5         u16_dat_vel1_final = (unsigned int)((CONSTANTE_CALC_VELOCIDADES/(
6             u16_dat_vel1_tempos[1] - u16_dat_vel1_tempos[0])));
7     }
8     else
9         u16_dat_vel1_final = 0;
10
11     u08_msg_vel1_final_low = u16_dat_vel1_final & 0xFF;
12     u08_msg_vel1_final_high = (u16_dat_vel1_final >> 8) & 0xFF;
13
14     u16_dat_vel1_tempos[0] = 0;
15     u16_dat_vel1_tempos[1] = 0;
16 }
```

3.2.4 Leituras Analógicas

A configuração das portas analógicas do PIC foi implementada em uma função genérica, que recebe como parâmetro o canal do conversor A/D utilizado. Baseado no valor indicado, os registradores `ADCON0`, `ADCON1` e `ADCON2` são configurados para o canal apropriado. Um exemplo da configuração pode ser visto no [Código 6](#)

Código 6: Exemplo de configuração da leitura analógica

```
1 switch (canal){ //Configura canal A/D
2     case 0:
3         ADCON0 = 0b00000001; //Porta A digital , somente AN 0 analógica
4         ADCON1 = 0b00001110;
5         ADCON2 = 0b10101010;
6         break;
7     case 1:
8         ADCON0 = 0b00000101; //Porta A digital , somente AN 1 analógica
9         ADCON1 = 0b00001101;
10        ADCON2 = 0b10101010;
11        break;
12 }
```

Para realizar a leitura das pressões de freio, são utilizadas as funções da biblioteca ADC.h, da Microchip. A função ConvertADC(), inicia o processo de conversão do sinal adquirido. O valor convertido é retornado em uma variável do tipo inteiro e representa o valor de tensão lido pela entrada analógica e, portanto, precisa ser convertido para uma unidade de pressão.

4 TESTES, RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para garantir o funcionamento dos sensores e do módulo eletrônico desenvolvido, foram realizadas uma bateria de testes. O primeiro passo é realizar testes de bancada, no qual os sinais são simulados utilizando geradores de sinais e um barramento de testes fora do carro. Com os dados validados, iniciaram-se os testes no protótipo, simulando as situações mais próximas da competição.

Os testes realizados tiveram por objetivo garantir que *hardware* e *software* estão funcionando conforme projetados. Para todos os sensores do carro, os testes foram divididos em duas etapas: testes em bancada e testes no protótipo. Para os testes em bancada foram utilizados geradores de sinais, para simular as condições desejadas e, no protótipo, os dados foram coletados pelo sistema de telemetria desenvolvido pela equipe EESC USP Formula SAE.

4.1 Velocidade das rodas

4.1.1 Teste em Bancada

A fim de testar os sensores utilizados, o primeiro teste executado foi fixar porcas metálicas em uma pequena ventoinha, aproximar o sensor para verificar a leitura do sinal e medir a distância mínima de funcionamento do sensor, para que ele possa ser instalado corretamente no carro.

Após isso, para verificar os cálculos da velocidade, um gerador de sinais foi utilizado. Quatro velocidades diferentes foram escolhidas: 20km/h, 50km/h, 80km/h e 100km/h. Utilizando a [Equação 14](#) e a [Equação 15](#), foi calculada a frequência que representa o valor escolhido. As frequências escolhidas e suas respectivas velocidades calculadas podem ser vistas na [Tabela 1](#):

Tabela 1: Validação da velocidade da roda

Frequência Calculada (Hz)	Frequência Utilizada (Hz)	Velocidade Calculada (km/h)
30,96	30,45	19,08
77,52	77,38	50,04
123,76	124,05	80,6
155,00	154,12	97,86

Fonte: Autor

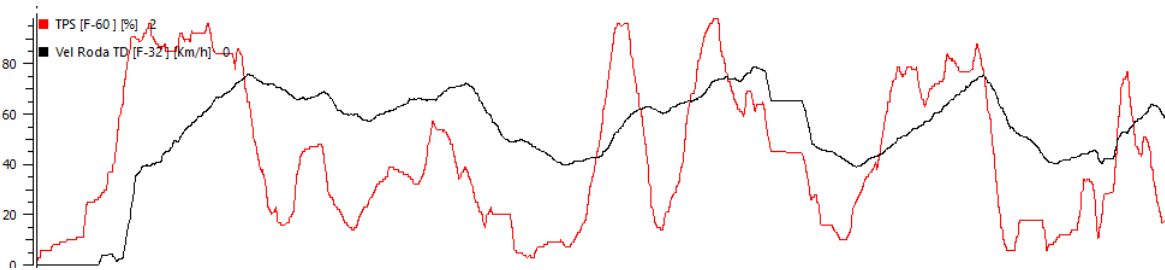
Pequenas variações foram observadas na velocidade calculada na [Tabela 1](#), originadas pelas limitações do gerador de onda, que não permite escolher a frequência gerada de

uma maneira precisa.

4.1.2 Validação no protótipo

Com o sistema instalado no carro, os sinais do sensor de velocidade das rodas foram coletados durante os testes. Na [Figura 18](#) está representado o *log* da velocidade do carro coletada durante um teste.

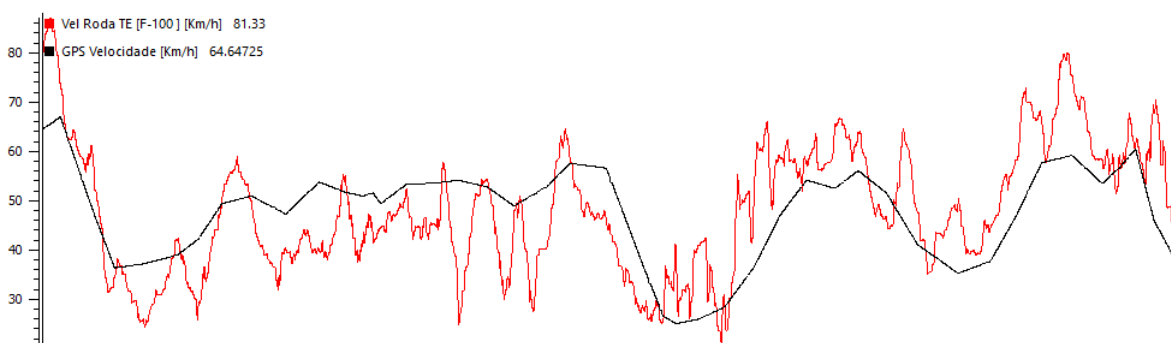
Figura 18: *Log* da Velocidade das Rodas



Fonte: Autor

No gráfico pode ser visto a velocidade da roda (preto), junto com a posição do sensor de TPS (*Throttle Position Sensor* - vermelho), que mede a abertura da borboleta de admissão, diretamente ligado ao pedal do acelerador. Dessa forma, pode-se verificar que a velocidade das rodas está coerente com os pontos de aceleração do carro. Para validar o valor da velocidade da roda, ele foi comparado com o valor obtido pelo módulo GPS presente no protótipo. O resultado pode ser visto na [Figura 19](#):

Figura 19: *Log* Comparativo das Velocidades Aquisitadas



Fonte: Autor

4.2 Pressão de Freio

4.2.1 Teste em Bancada

Devido à dificuldade para validar a leitura do sensor de pressão, os valores obtidos foram analisados com base nos valores esperados pelo projeto do sistema de freio do

protótipo. Ainda assim, a leitura das entradas analógicas foi validada utilizando um sensor de temperatura, que pode ser comparado com a leitura de um simples termômetro.

Os testes foram realizados utilizando uma mini-estufa e os valores coletados pelo PIC, através da leitura analógica, e pelo termômetro, podem ser vistos na [Tabela 2](#)

Tabela 2: Validação das Leituras Analógicas

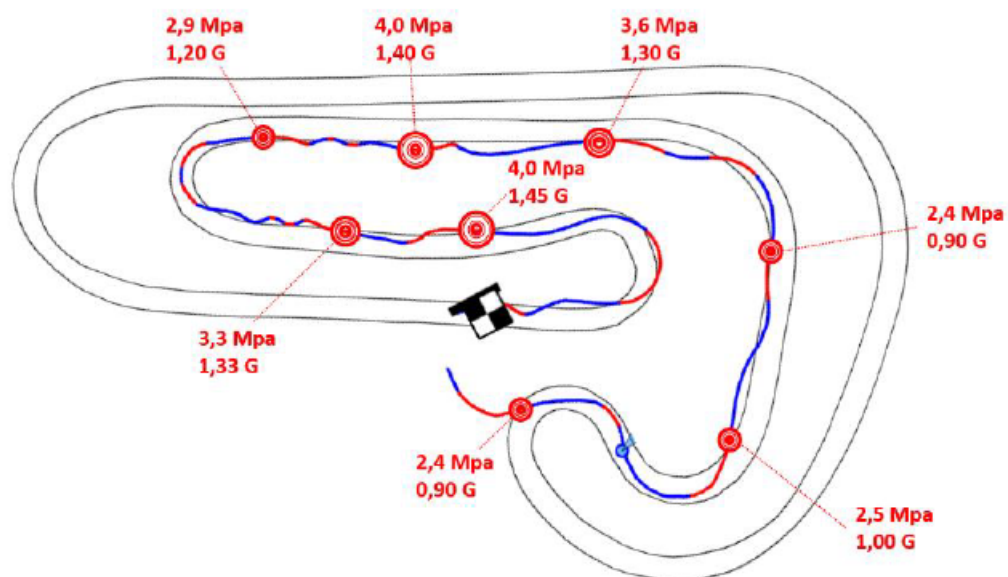
Temperatura PIC(°C)	Temperatura Termômetro(°C)	Erro(°C)
26	27,2	1,2
34	32,9	1,1
44	42,7	1,3
52	51,9	0,1
62	60,3	1,7

Fonte: Autor

4.2.2 Validação no protótipo

Para validar o sensor e o sistema de freios do protótipo, dois testes diferentes foram feitos. O primeiro, para validar a máxima pressão do sistema durante uma simulação da competição. A [Figura 20](#) mostra a *log* de uma volta no circuito de testes com a localização do GPS, as máximas pressões de freio obtidas em cada frenagem e a máxima desaceleração. O protótipo foi projetado para uma desaceleração máxima de 1,55g, e o máximo valor obtido de 1,45g mostra que o sistema está bem dimensionado e os valores coerentes.

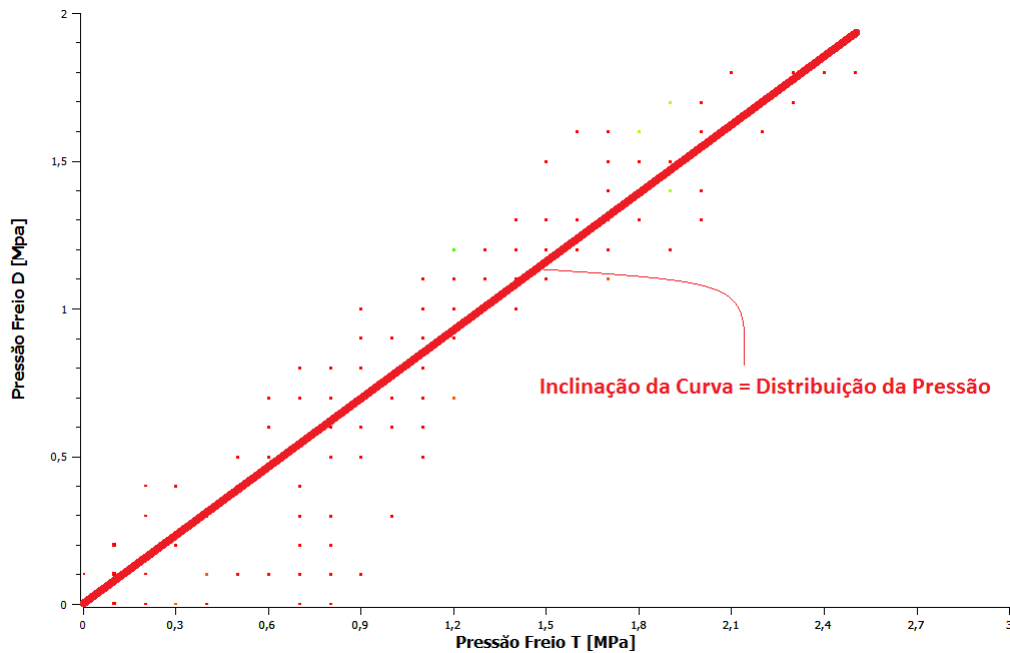
Figura 20: Log Máxima Pressão de Freio



Fonte: Autor

O segundo teste realizado, foi a distribuição de pressão nas linhas de freio dianteira e traseira. Conforme a [Figura 21](#), os dados coletados em testes indicam uma distribuição de 70% de pressão para o freio dianteiro e 30% para o freio traseiro, conforme projetado pela equipe.

Figura 21: *Log* Distribuição da Pressão das Linhas Freio



Fonte: Autor

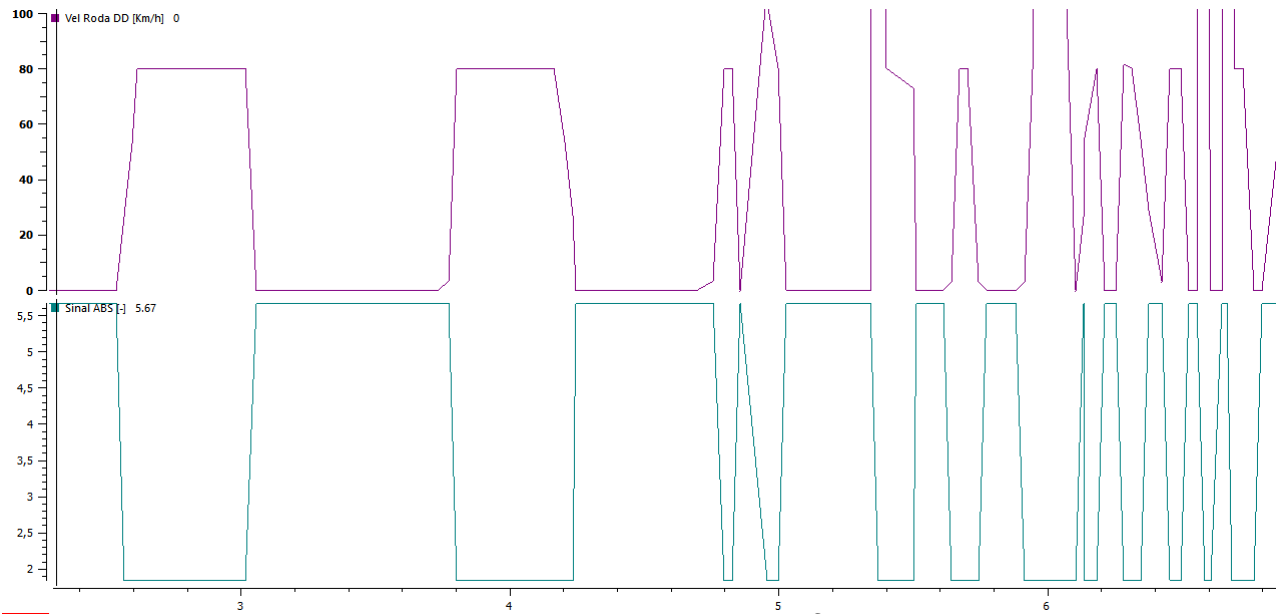
4.3 Acionamento ABS

4.3.1 Teste em Bancada

Na [Figura 22](#) pode ser analisado o sinal de controle do ABS gerado pelo módulo eletrônico. Para o teste, dois sinais foram gerados através de um gerador de ondas, sendo um para a velocidade do carro, mantido constante, e outro para a velocidade de uma das rodas.

O objetivo do módulo é comparar os sinais e ao verificar que o carro não está parado, e que a velocidade das rodas é zero, temos uma condição de travamento das rodas. Dessa forma, um sinal é gerado em uma saída digital do módulo, para acionar o sistema ABS e liberar a pressão da respectiva linha de freio. No *log* gerado, observa-se um comportamento adequado do sinal de saída para diferentes oscilações na velocidade da roda.

Figura 22: Log Sinal de saída para controle do ABS



Fonte: Autor

5 CONCLUSÃO

A eletrônica embarcada está cada vez mais presente nos veículos. Carros mais modernos contam com inúmeros módulos eletrônicos responsáveis tanto por monitorar o carro, para evitar acidentes e garantir o funcionamento ideal de todos os componentes, quanto para atuar no próprio veículo, melhorando sua performance, ou garantindo um maior conforto para motorista e passageiros.

O projeto teve como objetivo desenvolver um módulo de controle que garanta uma maior eficiência de frenagem para um protótipo do tipo fórmula, além de uma maior segurança para o seu piloto.

Durante o desenvolvimento do projeto, foi criada uma PCB responsável por coletar os dados necessários do protótipo, e um *firmware*, responsável por analisar esses dados e atuar quando necessário. O *hardware* e *software* foram projetados pensando na compatibilidade com o protótipo da Equipe EESC-USP Formula SAE, mas nada impede sua aplicação em diferentes projetos.

Por fim, pode-se concluir que o projeto desenvolvido neste trabalho atendeu aos objetivos esperados, podendo ser utilizado em um protótipo de formula SAE. Os resultados obtidos foram satisfatórios, com sensores e dados coletados validados, e um sinal de saída para ativação do ABS que correspondeu com as situações de necessidade de atuação.

5.1 Trabalhos futuros

A seguir, encontra-se uma lista de funcionalidades sugeridas para uma eventual continuação da implementação deste projeto.

- Implementação no protótipo de Formula SAE para testes em pista;
- Controle individual do sistema para cada roda;
- Utilização de um sistema de controle eletrônico para distribuição da pressão de freio (EBD)
- Sincronismo do sistema com o esterço do volante, garantindo maior dirigibilidade ao protótipo;
- Utilização do módulo para um controle de tração, impedindo que as rodas deslaciem durante uma aceleração.

REFERÊNCIAS

- BRAGA, N. C. **Eletrônica Automobilística**. 1. ed. São Paulo: NCB, 2013. 489 p. ISBN 9780768064599.
- COMO Funcionam os Freios a Tambor. Salao do Carro, 2012. Disponível em: <https://salaodocarro.com.br/como-funciona/freios-a-tambor.html>. Acesso em: 25 nov. 2017.
- DEUTSCH, J. **The Fracas Over Friction**. University of California Santa Cruz. Disponível em: <https://deutsch.physics.ucsc.edu/6A/book/forces/node21.html>. Acesso em: 15 nov. 2017.
- DIAS, A. **Carros Infoco**. 2017. Disponível em: <http://www.carrosinfoco.com.br/carros/category/guia-automovel/freios-guia-automovel/>. Acesso em: 31 nov. 2017.
- IBGE. **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística**. 2017. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/painel/frota.php>. Acesso em: 31 nov. 2017.
- JÚNIOR, J. S. da S. **Freio ABS**. Brasil Escola. Disponível em: <http://brasilecola.uol.com.br/fisica/freio-abs.htm>. Acesso em: 25 nov. 2017.
- METALTEX. **I8-1-DNA-K8**. 2017. Disponível em: <http://www.metaltex.com.br/editor/images/produtos/i12-4-dnc.jpg>. Acesso em: 18 nov. 2017.
- MICROCHIP. **PIC18f2680**. Microchip Technology Inc., 2007. Disponível em: <http://www.microchip.com/wwwproducts/en/PIC18F2680>. Acesso em: 31 nov. 2017.
- _____. **MCP2551**. Microchip Technology Inc., 2016. Disponível em: <http://www.microchip.com/wwwproducts/en/en010405>. Acesso em: 31 nov. 2017.
- MIYADAIRA, A. N. **Microcontroladores PIC18**: Aprenda e programe em linguagem c. 1. ed. São Paulo: Editora Érica Ltda., 2009. 400 p.
- NICE, K. **How Disk Brakes Works**. How Stuf Works. Disponível em: <https://auto.howstuffworks.com/auto-parts/brakes/brake-types/disc-brake1.htm>. Acesso em: 15 nov. 2017.
- SANTOS, M. A. da S. **Princípio de Pascal**. Brasil Escola. Disponível em: <http://brasilecola.uol.com.br/fisica/principio-de-pascal.htm>. Acesso em: 20 nov. 2017.
- SEGERS, J. **Analysis Techniques for Racecar Data Acquisition**. SAE International, 2014. (R.: Society of Automotive Engineers). ISBN 9780768064599. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=C6FengEACAAJ>.
- SENSATA. **112CP PT Series Combined Pressure and Temperature Sensor**. 2017. Disponível em: <http://www.sensata.com/sensors/pressure-sensor-hvac-112cp.htm>. Acesso em: 18 nov. 2017.
- WIKIPEDIA. **CAN_bus**. 2017. Disponível em: https://en.wikipedia.org/wiki/CAN_bus. Acesso em: 07 nov. 2017.

Anexos

ANEXO A – ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DO MICROCONTROLADOR

Figura 23: *Especificações Técnicas do Microcontrolador Microchip PIC18f2680*

Parameter Name	Value
Program Memory Type	Flash
Program Memory (KB)	64
CPU Speed (MIPS)	10
RAM Bytes	3,328
Data EEPROM (bytes)	1024
Digital Communication Peripherals	1-UART, 1-SPI, 1- I2C1- MSSP(SPI/I2C)
Capture/Compare/PWM Peripherals	1 CCP,
Timers	1 x 8-bit, 3 x 16-bit
ADC	8 ch, 10-bit
CAN	1 CAN
Temperature Range (C)	-40 to 150
Operating Voltage Range (V)	2 to 5.5
Pin Count	28

Fonte: Microchip. 2017. Disponível em
<http://www.microchip.com/wwwproducts/en/PIC18F2680>