

**CENTRO UNIVERSITÁRIO SUL DE MINAS
BACHAREL EM ENGENHARIA ELÉTRICA
SILVINEI DINIZ MARTINS**

**CONTROLE ELETRÔNICO DE ESTABILIDADE PARA UM TRICICLO A
COMBUSTÃO ADAPTADO PARA CADEIRANTE**

**Varginha
2018**

SILVINEI DINIZ MARTINS

**CONTROLE ELETRÔNICO DE ESTABILIDADE PARA UM TRICICLO A
COMBUSTÃO ADAPTADO PARA CADEIRANTE**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Elétrica do Centro Universitário do Sul de Minas UNIS-MG, como pré-requisito para obtenção do grau de bacharel, sob orientação do Prof. Esp. Roberto Lazarino do Prado Mudesto.

**Varginha
2018**

SILVINEI DINIZ MARTINS

**CONTROLE ELETRÔNICO DE ESTABILIDADE PARA UM TRICICLO A
COMBUSTÃO ADAPTADO PARA CADEIRANTE**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Elétrica do Centro Universitário do Sul de Minas UNIS-MG, como pré-requisito para obtenção do grau de bacharel, pela banca examinadora composta pelos membros:

Aprovado em 07 / 12 /2018

Prof. Roberto Lazarino do Prado Mudesto

Prof. Hugo Rodrigues Vieira

Prof. Érick Nagata

Não creio que haja uma emoção mais intensa para um inventor do que ver suas criações funcionando”.

Nicola Tesla

Mas os que esperam no Senhor, renovam suas forças, correm e não se cansam, caminham e não se fatigam e sobem voando como águias.

Adaptado de Isaías 40:31

RESUMO

O presente trabalho pretende implantar o Controle Eletrônico de Estabilidade para a otimização da segurança em um triciclo a combustão adaptado para cadeirante, dando andamento a um projeto mecânico que necessita da parte eletrônica para ser finalizado. O objetivo com isso é implantar de modo eficiente e o mais econômico possível, um controle eletrônico de estabilidade desenvolvido a partir das novas tecnologias embarcadas, utilizando microcontroladores encontrados muito facilmente hoje no mercado e por isso muito mais economicamente viável em relação aos utilizados pelas grandes montadoras. Para tanto utilizar-se-á do estudo das literaturas referentes existentes, dos materiais já desenvolvidos e disponíveis hoje no mercado tecnológico, tais como sensores, atuadores e microcontroladores em especial o Arduino, Sistemas de Controle de Frenagem, assim como de simulações computacionais. Tal empreitada justifica-se pelo número cada vez maior de mortes e feridos no trânsito no mundo todo, praticamente obrigando um número cada vez maior de engenheiros e cientistas a se dedicarem cada vez mais no intuito de se desenvolverem sistemas de transporte, seja ele coletivo ou individual, mais seguros para toda sociedade. Chegou-se, dessa maneira, ao final, baseado em tudo o que se dispôs até aqui, a um resultado satisfatório do ponto de vista da segurança que é na verdade o real objetivo do trabalho, entretanto, o ajuste entre os dispositivos e a entrada de outros necessários para maior robustez do protótipo, traz a necessidade do contínuo aperfeiçoamento deste projeto em trabalhos futuros, visto que o assunto é sobremaneira inesgotável do ponto de vista tecnológico.

Palavra chave: Controle Eletrônico de Estabilidade. Sistema de Controle de Frenagem. Microcontrolador Arduino.

ABSTRACT

The present work intends to deploy the electronic stability Control for the optimization of safety in a tricycle combustion adapted for wheelchair, giving progress to a mechanical design that requires electronics to be finalized. The goal with this is to deploy efficiently and more economical as possible, an electronic stability control developed from the new technology of embedded microcontrollers found very easily in the market today and so much more economically feasible compared to those used by the major automakers. To do so use the study of existing materials related literatures already developed and available in the market today, such as sensors, actuators and the Arduino microcontrollers, Brake control systems, as well as computer simulations. Such a contract is justified by the increasing number of deaths and wounded in traffic worldwide practically forcing a growing number of engineers and scientists to devote themselves more and more in order to develop transport systems, be it collective or individual, safer for the whole society. It was thus in the end, based on everything that had thus far, a satisfactory outcome from the point of view of security that is in fact the real purpose of the work, however, the adjustment between devices and other necessary input for greater robustness of the prototype, brings the need for continuous improvement of this project in future work, since the subject is greatly inexhaustible on the technological point of view.

Keywords – *Electronic stability control. Braking control system. Arduino microcontroller.*

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Vista lateral do triciclo -----	11
Figura 2: Vista traseira do triciclo.-----	11
Figura 3: Tipos de orientação-----	13
Figura 4: Sub. e sobre-esterçamento-----	14
Figura 5: Aplicação de forças diferenciais-----	14
Figura 6: Taxa de variação yaw -----	15
Figura 7: Diagrama de blocos -----	16
Figura 8: Válvula borboleta motorizada -----	18
Figura 9: Válvula de controle de fluxo proporcional-----	19
Figura 10: Sensor de medição e controle de nível -----	20
Figura 11: Diagrama de blocos PID -----	21
Figura 12: Sensor magnético de rotação -----	23
Figura 13: Sensor de ângulo de direção-----	24
Figura 14: Sensor yaw-----	24
Figura 15: Acelerômetro e giroscópio-----	26
Figura 16: Gráfico Aderência/deslizamento-----	28
Figura 17: Aspectos básicos do ABS-----	29
Figura 18: Módulo elétrico com unidade hidráulica-----	30
Figura 19: Diagrama de blocos de um sistema antibloqueio -----	31
Figura 20: Atuador solenoide. -----	31
Figura 21: Placa Arduino Uno R3-----	33
Figura 22: Hardware do Arduino-----	34
Figura 23: Interface IDE -----	35
Figura 24: Módulo giroscópio MPU6050 -----	38
Figura 25: Ligações Arduino-giroscópio -----	38
Figura 26: Relê de interface com o atuador -----	39
Figura 27: Interfaces do sistema -----	40
Figura 28: Interface do Simulink -----	41
Figura 29: Diagrama de blocos do Simulink -----	43
Figura 30: Gráfico da resposta -----	44
Figura 31: Gráfico da 2ª tentativa-----	45
Figura 32: Testes de bancada para simulação de uma curva real ---	45

Figura 33: Gráfico do sensor MPU 6050 durante a simulação-----	46
Figura 34: Construção do protótipo -----	47
Figura 35: Arranjo dos atuadores com cilindros de freio -----	48
Figura 36: Fixação dos atuadores e sensor -----	48
Figura 37: Testes do módulo ABS -----	49

LISTA DE EQUAÇÕES

Fórmula 1	18
Fórmula 2	19
Fórmula 3	19
Fórmula 4	19
Fórmula 5	20
Fórmula 6	20
Fórmula 7	20
Fórmula 8	20
Fórmula 9	21
Fórmula 10	21
Fórmula 11.....	22

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
2 ESTUDO PARA O DESENVOLVIMENTO DOS CONTROLADORES	16
2.1 Controladores automáticos	16
2.1.1 Classificação dos controladores eletrônicos	17
2.1.1.1 Controle de duas posições on-off	17
2.1.1.2 Controle proporcional	18
2.1.1.3 Controle integral	19
2.1.1.4 Controle proporcional-integral	20
2.1.1.5 Controle proporcional-derivativo	20
2.1.1.6 Controle proporcional-integral-derivativo	21
3 ESTUDO DOS SENSORES A SEREM UTILIZADOS NO ESP	22
3.1 Sensor magnético de velocidade da roda	23
3.2 Sensor de ângulo de direção	24
3.3 Sensor yaw e de aceleração lateral	24
3.4 Sensor giroscópio	25
3.5 Sensor acelerômetro	25
4 ESTUDO DOS ATUADORES	27
4.1 ABS Breve histórico.....	27
4.2 Apresentação de um Sistema Antibloqueio (ABS).....	28
4.2.1 Modulador Hidráulico com Unidade de Comando Integrada.....	29
4.3 Solenoide.....	31
5 CENTRAL ELETRÔNICA COM ARDUINO	33
5.1 O Arduino UNO	33
5.2 A IDE Arduino	35
6 INTERFACES ARDUINO-SENSORES-ATUADORES	37
6.1 Leitura das rodas	37
6.2 Leitura dos ângulos	37
6.3 Interface com atuador	39
7 MODELAGENS COMPUTACIONAIS	41
8 TESTES	47
8.1 Adaptação dos atuadores e sensor.....	47
8.2 Adaptação do ABS.....	49
9 CONCLUSÕES.....	50
9.1 Pontos de Continuidade do Trabalho.....	51
REFERÊNCIAS.....	52
ANEXO A.....	54
ANEXO B.....	56

1 INTRODUÇÃO

O avanço da tecnologia dos veículos tem sido apontado como a principal causa da redução de mortes no trânsito. Além do usual cinto de segurança, acessórios como “airbags” frontal e lateral, sistema de controle de frenagem (ABS), programa eletrônico de estabilidade (ESP) e dispositivo antiderrapante (ASR), por exemplo, deixaram de ser um luxo (LIMA, 2005).

Apesar disso, acidentes ainda acontecem e por vezes o acidentado fica com sequelas ou até mesmo com deficiências, impossibilitando-o de voltar a conduzir veículo ou ter de volta a sensação de liberdade como o é a de pilotar uma motocicleta.

Em vista disto e pensando ainda na questão da acessibilidade, o presente trabalho busca a resolução do problema da estabilidade e da segurança de um triciclo automotivo a gasolina adaptado para cadeirante num protótipo já existente e em testes, utilizando uma plataforma de controle eletrônico muito mais acessível: Microcontrolador Arduino.

O objetivo deste trabalho é criar, a partir das novas tecnologias embarcadas, tais como microcontroladores, sensores e atuadores, um controle eletrônico de estabilidade – ESP – para este protótipo de triciclo para cadeirante, visando a otimização da segurança e de modo peculiar a inclusão social.

Na Figura 1, destaca-se a vista lateral do protótipo no qual se pretende adaptar o ESP e Figura 2 vista parcial traseira.

Figura 1: Vista lateral



Fonte: Autor (2018).

Figura 2: Vista traseira



Fonte: Autor (2018).

A motivação para um sistema eletrônico de estabilidade (ESP) e antibloqueio (ABS) é que se pode melhorar o desempenho da frenagem dos veículos comparado com o sistema de freio convencional (LIMA, 2005). A melhoria do desempenho é tipicamente almejada nas áreas de estabilidade, dirigibilidade e distância de parada, envolvendo para isso o que foi

assimilado nas disciplinas de Eletrônica e, sobretudo na de Controle, ministradas durante o curso.

O ESP e o ABS controlam o deslizamento de cada roda para prevenir o seu travamento, assim como uma elevada força de atrito entre o pneu e a pista é alcançada e a dirigibilidade mantida (KELBER, 2005). Tanto o ESP quanto o ABS são importantes componentes de um complexo sistema de direção dos carros modernos. A maioria dos controladores ABS disponíveis no mercado são implementados com controladores on-off (controlador “Bang-Bang”), já o ESP, uma gama maior de controladores.

Contudo o sistema ESP, ao contrário do ABS, é um conceito muito moderno e recente no que diz respeito à segurança veicular, o que o torna um tanto quanto caro e de difícil acesso a projetistas e desenvolvedores que não possuam contrato com as grandes montadoras.

Nesse sentido, a motivação desse trabalho é justamente a elaboração de um ESP muito mais acessível economicamente através do microcontrolador Arduino.

Este trabalho vislumbra ainda a possibilidade de se utilizar, juntamente com os sistemas eletrônicos, o sistema de freio-por-fio (brake-by-wire, BBW).

Segundo Lima (2005), na última geração de sistemas de freio-por-fio (brake-by-wire, ou ainda BBW) o desempenho do ABS precisa ser melhorado. O freio por fio (brake-by-wire) significa que não existe uma conexão hidráulica ou mecânica entre o pedal do freio e os atuadores.

O comando de freio do motorista resulta em um sinal elétrico que é comunicado via micro controlador para os atuadores. Essa nova tecnologia requer novos tipos de atuadores de freio como o eletromecânico, ou o eletro-hidráulico.

A principal característica dos freios eletromecânico e eletro-hidráulico, comparados aos freios convencionais, com válvula solenoide, é que eles permitem o ajuste contínuo da força de freio (HEDENETZ; BELSCHNER, 1998).

Ainda segundo Hedenetz; Belschner (1998), o sistema de freio eletromecânico (EMB), também conhecido como freio por fio (brake-by-wire), toma o lugar dos sistemas de freio hidráulico com um sistema de componentes elétricos completamente “seco” por trocar os atuadores convencionais pelos motores elétricos induzidos.

O mesmo é projetado para melhorar a conectividade com outros sistemas do veículo; assim possibilita uma simples integração de funções de mais alto nível como o controle de tração (ETS), controle de aceleração (ASR), programa de estabilidade eletrônica (ESP) e sistema de freio assistido (BAS). Esta integração possivelmente trará várias combinações de

funções dentro do sistema EMB, como no ABS, por conectar estes sistemas adicionais usando enlaces (links) de comunicação (KELBER, 2005).

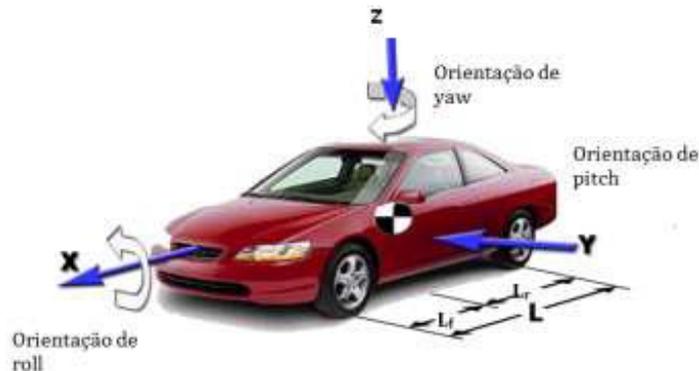
Obviamente, por ser um protótipo, nesse trabalho, verificar-se-á a possibilidade destas integrações.

Para um melhor entendimento do ESP há de se entender alguns termos, quais sejam:

- a) Rotação yaw: rotação em torno do eixo vertical do veículo;
- b) Sobre-esterçante: tendência do veículo de girar em torno do eixo vertical de um ângulo maior que o necessário para realizar a curva;
- c) Sub-esterçante: tendência do veículo de seguir uma trajetória retilínea quando se inicia a realização de uma curva;
- d) Controle de frenagem diferencial: aplicação de frenagem das rodas com intensidades diferentes;

Na Figura 3 observam-se os tipos de orientação de um veículo.

Figura 3: Tipos de orientação.



Fonte: Morigushi (2010).

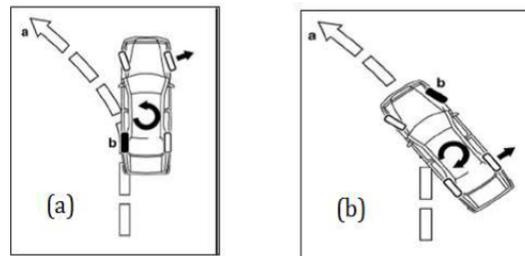
De acordo com Kelber (2005), o princípio da estratégia do ESP está fundamentado na utilização do controle de estabilidade por frenagem diferencial para o controle da rotação yaw.

E segundo Morigushi (2010), ao realizar uma manobra de emergência o veículo pode sofrer a tendência de desvio de trajetória como derrapar de forma sobre ou sub-esterçante. Ao frear de maneira diferencial as rodas do lado esquerdo ou direito, surge um momento sobre a rotação yaw devido à força de frenagem aplicada a uma distância do centro de rotação do veículo, que se aplicado de forma controlada auxilia a restaurar a trajetória desejada.

Se a tendência é de forma sub-esterçante (tendência do veículo de seguir uma trajetória retilínea quando se inicia a realização de uma curva) o sistema aumenta a força de

frenagem na roda traseira do lado interno da curva indicada pela letra “a” na Figura 4 e se a tendência for sobre-esterçante (tendência do veículo de girar em torno do eixo vertical de um ângulo maior que o necessário para realizar a curva) o sistema aumenta a aplicação de força de frenagem na roda dianteira do lado externo da curva indicada com a letra “b” na Figura 4 (MORIGUSHI, 2010).

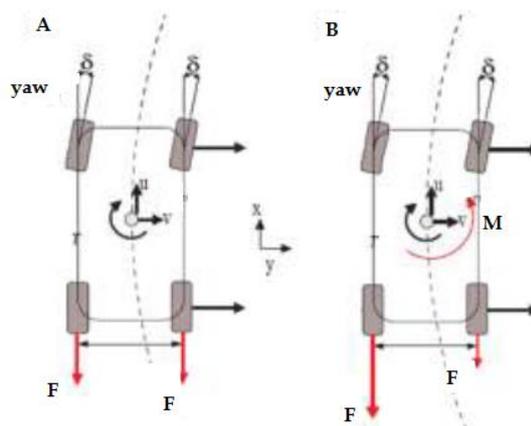
Figura 4: Sub. e sobre-esterçamento.



Fonte: Morigushi (2010).

A Figura 5 ilustra como a aplicação diferenciada da pressão nos freios pode contribuir para a estabilidade do veículo. Segundo Morigushi (2010), o momento M , determinado pela diferença nas forças F de frenagem das rodas e pela distância b , pode ser aplicado no sentido horário ou anti-horário conforme a necessidade para estabilizar a trajetória do veículo.

Figura 5: Aplicação de forças diferenciadas.



Fonte: Morigushi (2010).

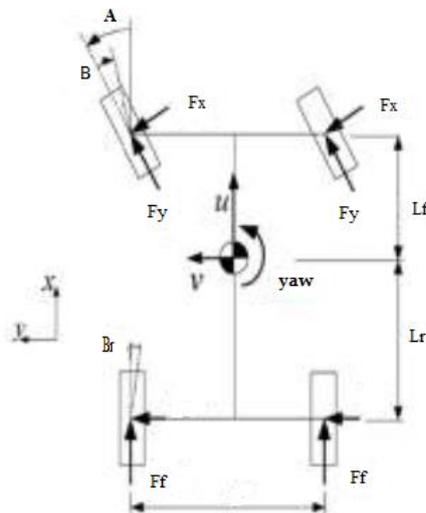
Morigushi (2010) utiliza o valor do ângulo de escorregamento lateral dos pneus para estabelecer uma lei de controle para estabilidade utilizando a frenagem diferencial entre suas

rodas, isto é, aplicando torques de frenagem diferentes para cada roda do veículo. O controle proposto é deduzido diretamente da lei baseada de frenagem diferencial em um modelo com movimento no plano de rotação horizontal de três graus de liberdade de um veículo.

Conforme Morigushi (2010), a entrada de dados do controle é obtida diretamente da lei de controle deslizante baseada no plano mencionado. O ponto inicial de controle pode ser verificado por duas aproximações, conforme Figura 6:

- a) Taxa de variação de rotação yaw (em torno do eixo vertical do veículo);
- b) Análise do plano de fase do ângulo de escorregamento lateral do veículo em função da velocidade angular da lateral do veículo;

Figura 6: Taxa de variação yaw e ângulo de escorregamento



Fonte: Morigushi (2010).

Então o objetivo do controle para atingir a estabilidade é uma combinação entre os valores da taxa de variação da rotação yaw do veículo e o ângulo de escorregamento das rodas.

Para que este objetivo seja alcançado se faz necessário o conhecimento dos controladores que possam vir a solucionar tal problema. No próximo capítulo se discutirá alguns desses controladores.

2 ESTUDO PARA DESENVOLVIMENTO DOS CONTROLADORES

Nesta etapa apresentam-se os aspectos estudados para o desenvolvimento e análise dos controladores a serem utilizados no protótipo.

2.1 Controladores automáticos

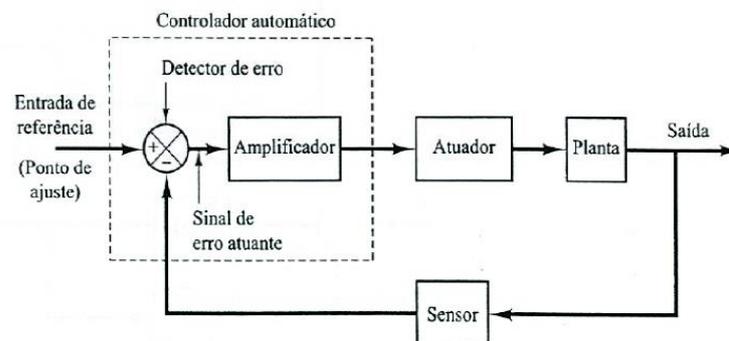
Um controlador automático compara o valor real de saída da planta com a entrada de referência (valor desejado), determina o desvio e produz um sinal de controle que reduzirá o desvio a zero ou a um valor pequeno. A maneira pela qual o controlador automático produz o sinal de controle é chamada ação de controle (ALVARENGA, 2011).

A Figura 7 é um diagrama de blocos de um sistema de controle industrial, similar ao que será utilizado neste trabalho, o qual consiste em um controlador automático, um atuador, uma planta e um sensor (elemento de medição).

Segundo Ogata (2010), o controlador detecta o sinal de erro atuante, o qual normalmente é de potência muito baixa, e o amplifica a um nível suficientemente alto.

A saída de um controlador automático alimenta um atuador, como um motor elétrico, um motor hidráulico, um motor pneumático ou uma válvula, cuja função é atuar para a máxima redução do erro. O atuador é um dispositivo de potência que produz o sinal de entrada na planta de acordo com o sinal de controle, de modo que a saída se aproxime ao máximo do sinal de entrada de referência (OGATA, 2010).

Figura 7 – Diagrama de blocos de um controlador automático



Fonte: Ogata (2010).

2.1.1 Classificação dos controladores eletrônicos

De acordo com Ogata (2010) a maioria dos controladores industriais pode ser classificada, de acordo com suas ações de controle em:

- a) Controladores de duas posições ou on-off;
- b) Controladores proporcionais;
- c) Controladores integrais;
- d) Controladores proporcionais-integrais;
- e) Controladores proporcionais-derivativos;
- f) Controladores proporcionais-integral-derivativos;

A maior parte dos controladores industriais utiliza eletricidade ou fluido pressurizado, como óleo ou ar, como fontes de energia. Como consequência, os controladores também podem ser classificados de acordo com a espécie de energia empregada na operação, como controladores pneumáticos, controladores hidráulicos ou controladores eletrônicos (ALVARENGA, 2011).

A escolha do tipo de controlador a ser utilizado deve ser decidida com base na natureza da planta e nas condições de operação, incluindo certas considerações como segurança, custo, disponibilidade, confiabilidade, precisão, peso e tamanho (OGATA, 2010).

Devido a grande quantidade de processos, sensores e atuadores que poderão ser necessários neste projeto, faz-se necessário uma breve explanada sobre os principais tipos de controladores eletrônicos a serem utilizados.

2.1.1.1 Controle de duas posições ou on-off

Em um sistema de controle de duas posições, o elemento atuante tem somente duas posições fixas, que são, em muitos casos, simplesmente on e off. O controle de duas posições ou on-off – exemplo da Figura 8 - é relativamente simples e barato e, por essa razão, é bastante utilizado em sistemas de controle domésticos e industriais (BISHOP, 2011).

Figura 8: Válvula borboleta motorizada.



Fonte: Alfa Soluções (2018).

Os controladores de duas posições são, em geral, dispositivos elétricos, e as válvulas operadas por solenoides elétricos são muito utilizadas nesses controladores (BISHOP, 2011).

2.1.1.2 Controle Proporcional

De acordo com Ogata (Ogata, 2010) para um controlador com ação de controle proporcional, a relação entre a saída do controlador $u(t)$ e o sinal de erro atuante $e(t)$ é:

$$u(t) = K_p e(t) \quad \text{ou por Laplace:} \quad \frac{U(s)}{E(s)} = K_p \quad (1)$$

Onde K_p é denominado ganho proporcional.

A Figura 9 apresenta um dispositivo muito utilizado na indústria, quando o controle do sistema requer apenas um controle proporcional.

Figura 9: Válvula de controle de fluxo proporcional



Fonte: Direct Industry (2018).

2.1.1.3 Controle integral

Em um controlador com ação de controle integral, o valor da saída $u(t)$ do controlador é modificado a uma taxa de variação proporcional ao sinal de erro atuante $e(t)$ (OGATA, 2010). Exemplo da Figura 10 - dispositivo eletrônico que mede a altura do material, normalmente líquido, em um tanque ou outro recipiente. Processos de controle integral que são utilizados em muitas indústrias. Ou seja:

$$\frac{du(t)}{dt} = K_i e(t) \quad (2)$$

ou

$$u(t) = K_i \int_0^t e(t) dt \quad (3)$$

Onde K_i é uma constante ajustável. A função de transferência de um controlador integral é:

$$\frac{U(S)}{E(S)} = \frac{K_i}{S} \quad (4)$$

Figura 10: Sensor de medição e controle de nível



Fonte: Alfa Soluções (2018).

2.1.1.4 Controle proporcional-integral

Segundo Ogata (2010) ação de controle de um controlador proporcional-integral é definida por:

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt \quad (5)$$

Ou, então, a função de transferência do controlador é:

$$\frac{U(S)}{E(S)} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i S} \right) \quad (6)$$

Onde T_i é chamado *tempo integrativo*.

2.1.1.5 Controle proporcional-derivativo.

A ação de controle de um controlador proporcional-derivativo é definida por:

$$u(t) = K_p e(t) + K_p T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (7)$$

E a função de transferência é:

$$\frac{U(S)}{E(S)} = K_p (1 + T_d S) \quad (8)$$

Onde T_d é chamado *tempo derivativo*.

2.1.1.6 Controle proporcional-integral-derivativo

A combinação das ações de controle proporcional, de controle integral e de controle derivativo é denominada ação de controle proporcional-integral-derivativo. Essa ação combinada tem as vantagens individuais de cada uma das três ações de controle (OGATA, 2010). A equação de um controlador com essas ações combinadas é dada por:

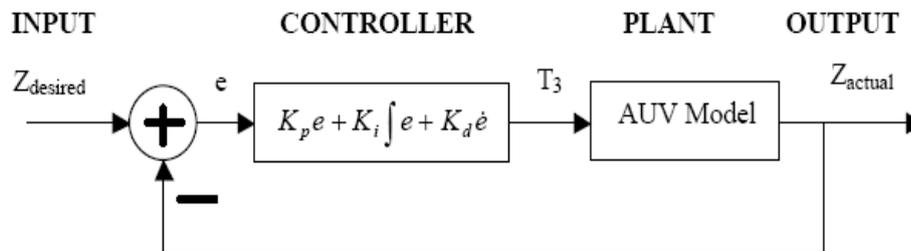
$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int e(t) dt + K_p T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (9)$$

E a função de transferência é:

$$\frac{U(S)}{E(S)} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i S} + T_d S \right) \quad (10)$$

Onde K_p é o ganho proporcional, T_i é o tempo integrativo e T_d é o tempo derivativo. A Figura 11 trás um exemplo de diagrama de blocos de um controlador PID:

Figura 11: Diagrama de blocos PID.



Fonte: Bishop (2011).

Resumindo a colaboração de cada controlador PID do sistema fica:

- Proporcional: Reage ao erro corrente, acelera a resposta e reduz o erro sem eliminá-lo;
- Integral: Reage ao erro passado, torna o sistema mais lento, mas elimina o erro;
- Derivativo: Aumenta o amortecimento e diminui o overshoot.

Para que os controladores façam desempenhem bem seu papel no sistema como um todo, é necessário que sejam alimentados com as devidas informações. Tais informações são lidas e enviadas pelos sensores. Na próxima etapa faz-se um estudo dos sensores que poderão ser usados neste projeto.

3 ESTUDO DOS SENSORES A SEREM UTILIZADOS NO ESP

O controle, segundo Morigushi (2010), consiste basicamente em corrigir a taxa de *yaw* do veículo através das pressões de freio diferenciais. Quando um veículo realiza uma curva existe uma taxa de *yaw* que é o desejável (ϕ_{des}) para o triciclo realizar a curva de forma estável.

Esta taxa depende basicamente da velocidade longitudinal do veículo (x), ângulo de esterçamento nas rodas (δ) (que pode ser correlacionada com ângulo de esterçamento no volante) e de propriedades do triciclo, como centro de gravidade, massa (m) e o *cornering stiffness* ($C_{\alpha f}$ e $C_{\alpha r}$) ou ângulo de deslizamento entre rodas e superfície, da roda traseira e do eixo dianteiro (MORIGUSHI, 2010). A relação pode ser observada na equação abaixo.

$$\phi_{des} = \frac{x\delta}{L + \frac{mx^2 l_r C_{\alpha r} - l_f C_{\alpha r}}{2C_{\alpha r} C_{\alpha f} L}} \text{ rad/s} \quad (11)$$

Onde:

L é distância entre o eixo dianteiro e a roda traseira;

l_r é a distância entre a roda traseira e o centro de massa;

l_f é a distância entre o eixo dianteiro e o centro de massa;

O objetivo é programar o sistema para fornecer os dados acima para um software adequado, que poderá, inclusive, calcular a taxa de *yaw* desejável a cada instante, também informando a taxa de *yaw* real que atua no protótipo em questão em um determinado instante de tempo, que muitas vezes é diferente do ideal, devido a elevadas taxas de escorregamento lateral ($C_{\alpha r}$ e $C_{\alpha f}$) ocasionada por baixo coeficiente de atrito entre pneu e superfície, esterçamento brusco ou outras causas, que leva o triciclo a trabalhar numa situação de regime transiente, ocasionando um comportamento inesperado do veículo.

É nesta diferença entre as taxas real e desejável de *yaw* que o controle deve atuar, de forma a aproximar ao máximo a situação real da situação desejável, trazendo o triciclo para um comportamento mais seguro.

Para tanto, faz-se necessária a leitura desse comportamento real, para que se insira no controle as entradas necessárias, as quais serão trabalhadas pelo sistema e obtidas as saídas desejadas. Esta tarefa é realizada pelos sensores.

Sensores a serem utilizados neste trabalho:

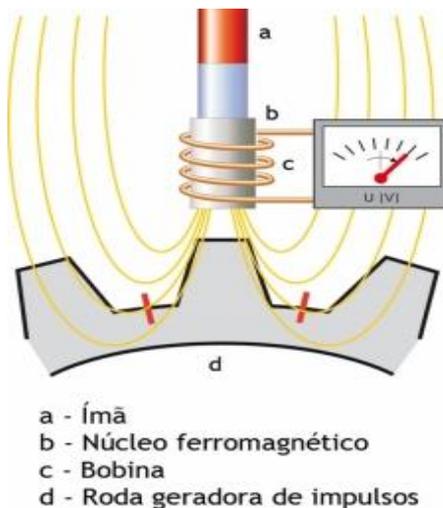
- a) Sensor Magnético de Velocidade de Roda;
- b) Sensor de Ângulo de Direção;
- c) Sensor Yaw e de Aceleração Lateral;
- d) Sensor Acelerômetro e Giroscópio do Arduino;

Os sensores enviam informações que alimentarão as entradas da placa eletrônica do Arduino, representando aqui a central do ESP, numa fração de segundo, conseguindo assim detectar imediatamente qualquer anormalidade, corrigindo a tempo a trajetória do triciclo através da frenagem diferencial.

3.1 Sensor magnético de velocidade da roda.

A unidade de comando utiliza esse tipo de sensor para medir a velocidade do triciclo. Para isso, ela utiliza dois princípios de operação diferenciados: O sensor de velocidade de roda passivo e o ativo. Ambos calculam a velocidade da roda sem contato, por meio de campos magnéticos. Esses sensores identificam o sentido de rotação e/ou imobilização das rodas (FUELTECH, 2018).

Figura 12: Sensor magnético de rotação.



Fonte: Fueltech (2018).

Características Elétricas:

- a) Fio Vermelho: 5V, 12V ou 24V Pós chave;
- b) Fio Preto: Negativo da Bateria;
- c) Fio Preto/Branco: Saída de Sinal Hall;

3.2 Sensor de ângulo de direção.

É quem mede a posição do volante. Faz isso por meio do ângulo de direção, da velocidade do veículo e da pressão de frenagem pretendida. Ele é quem informa o percurso que o piloto pretende seguir (FUELTECH, 2018).

Figura 13: Sensor de ângulo de direção



Fonte: Fueltech (2018).

3.3 Sensor yaw e de aceleração lateral

É quem registra todos os movimentos do triciclo ao redor do seu eixo vertical. Trabalha junto com o sensor de aceleração lateral integrado e determina a real trajetória do veículo, calculando e comparando com a intenção do piloto (FUELTECH, 2018).

Figura 14: Sensor yaw.



Fonte: Fueltech (2018).

3.4 Sensor Giroscópio

Sensores giroscópios podem monitorar a orientação, direção, movimento angular e rotação. No smartphone, um sensor giroscópio geralmente executa funções de reconhecimento de gestos. Além disso, os giroscópios em smartphone ajudam a determinar a posição e orientação do aparelho (MOTA, 2016).

3.5 Sensor Acelerômetro

O acelerômetro é um sensor que mede aceleração, bem como a inclinação, ângulo de inclinação, rotação, vibração, colisão e gravidade. Quando utilizado em um smartphone, o acelerômetro pode mudar automaticamente o visor do celular na vertical ou horizontal, já que esse sensor pode verificar em que eixo vetor aceleração da gravidade atua (MOTA, 2016).

Esse sensor utiliza o protocolo de comunicação I2C. O I2C é um protocolo de baixa velocidade de comunicação criado pela Philips para comunicação entre placa mãe e dispositivos, Sistemas Embarcados e circuitos de celulares (MOTA, 2016).

O I2C, além de definir um protocolo, é também composto do barramento que é conhecido como TWI (Two Wire Interface), um barramento de dois fios composto por um fio para Clock (SCL) e outro para Dados (SDA). Cada um conectado a um resistor que funciona como PullUp para o VCC.

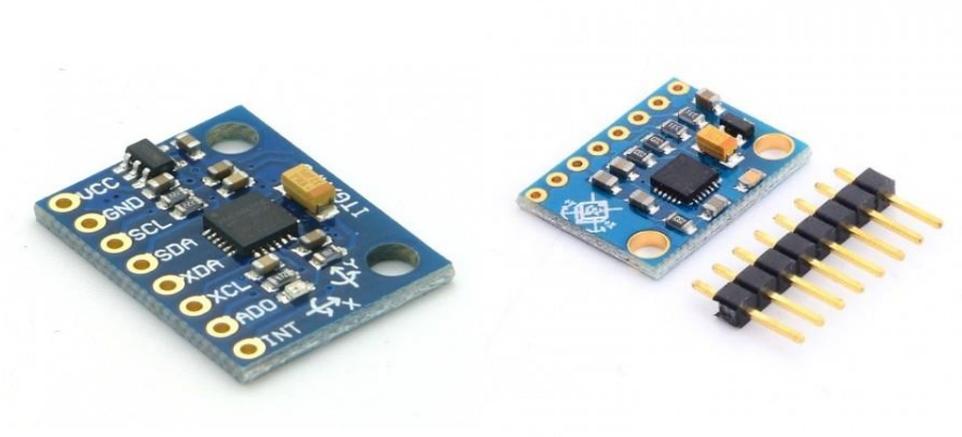
Ainda segundo Mota (2015) o I2C é composto por dois tipos de dispositivos, Mestre e Slave, sendo que normalmente um barramento é controlado por um Mestre, e possui diversos outros Slaves, porém é possível implementar um barramento com outros Mestres que solicitam o controle temporariamente do barramento.

Cada dispositivo no barramento é identificado por um endereço 10 bits, alguns dispositivos podem ser de sete bits.

Estes sensores utilizam a placa sensor MPU-6050 (Figura 15) que combina 3 eixos de giroscópio e 3 eixos de acelerômetro juntamente com um processador digital de movimento (MCROBERTS, 2011).

Utilizando as entradas auxiliares, podemos conectar uma bússola externa de 3 eixos para fornecer 9 eixos na saída. O MPU6050 suprime problemas de alinhamento de eixos que podem surgir em partes distintas (MCROBERTS, 2011).

Figura 15: Placa MPU-6050 – Acelerômetro e Giroscópio.



Fonte: Usina Info (2018).

Em suma, os sensores fazem a leitura de todo o estado físico do sistema, transformando-os em dados que serão enviados para a central eletrônica ou microprocessador, que irá comparar os dados recebidos e acionará o atuador para a correção da trajetória, caso seja necessária.

No próximo capítulo, se introduzirá os aspectos fundamentais dos atuadores a serem utilizados neste projeto, a fim de se alcançar os resultados almejados.

4 ESTUDO DOS ATUADORES

De posse do estudo feito na etapa anterior, inicia-se o desenvolvimento dos atuadores do sistema.

4.1 ABS - Breve histórico

Os atuais sistemas de antibloqueio hidráulico foram concebidos de sistemas desenvolvidos para trens no início de 1900. Em seguida, os sistemas antibloqueio foram desenvolvidos para ajudar as aeronaves pararem rapidamente em linha reta nas pistas escorregadias. Em 1947, os primeiros aviões a usar ABS foram os bombardeiros B-47 para evitar o estouro do pneu em pistas de concreto seco e a derrapagem do mesmo em pistas de gelo (LIMA, 2005 apud PETERSEN, 2003).

O primeiro automóvel a usar o ABS foi uma série limitada Lincolns que foi adaptado de uma aeronave francesa. No final dos anos 60, Ford, Chrysler, e Cadillac ofereciam ABS em poucos modelos. Estes foram os primeiros sistemas a usar computadores analógicos e moduladores a vácuo (LIMA, 2005).

Anteriormente aos moduladores a vácuo, a passagem de um ciclo de pressurização (aumento de pressão) para um ciclo de despressurização (redução da pressão) era muito lenta e a distância de parada real dos veículos era grande.

E conforme Lima (2005), no final dos anos 70, a Mercedes e a BMW introduziram um sistema ABS controlado eletronicamente. Em 1985 a Mercedes, a BMW e a Audi introduziram um sistema ABS Bosch e a Ford introduziu seu primeiro sistema Teves.

Pelo final dos anos 80, os sistemas ABS foram oferecidos em muitos carros de luxo e esporte. Hoje, os sistemas de freio, na maioria dos veículos de passageiros e leves, se tornaram complexos, sendo controlados por computador (LIMA, 2005).

Durante o processo de frenagem o deslizamento da roda (λ) é iminente, ele aumenta conforme a pressão de frenagem aumenta. O deslizamento é a relação da diferença entre a velocidade do veículo e da roda sobre a velocidade do veículo ($\lambda = (VV - VR)/VV$) (FUELTECH, 2018).

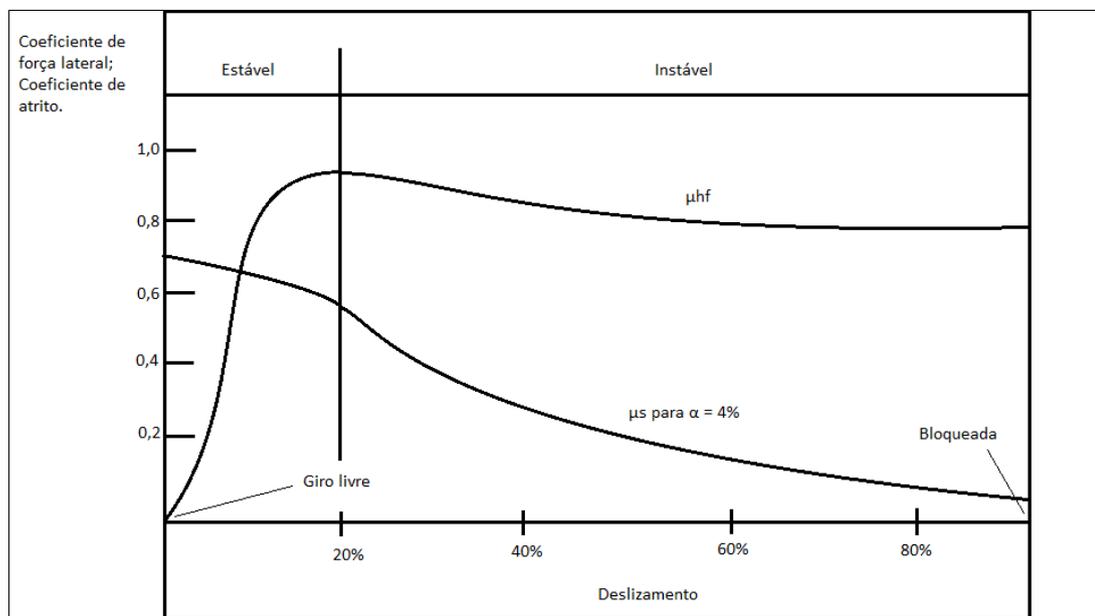
Segundo Olivi (2014), relacionando o deslizamento da roda e o atrito dos pneus com a pista, seja este em retas ou curvas (μ_{HF} e μ_S) é possível analisar até que ponto os pneus devem deslizar, ou seja, a análise que a ECU (Eletronic Central Unit) faz é justamente procurar manter os pneus no limiar entre deslizamento e travagem.

Quando um veículo é brecado, o coeficiente de atrito e o deslizamento aumentam até certo ponto, no qual um veículo sem ABS bloquearia facilmente as rodas a partir desse ponto.

O bloqueio é caracterizado por uma abrupta desaceleração da roda, que no gráfico aderência/deslizamento da Figura 16 é representado por uma queda da curva e posterior estabilização em um valor de coeficiente de atrito inferior (dinâmico).

Conforme Lima (2005), essa queda é ainda mais acentuada quando a curva analisada é referente ao coeficiente de força lateral. Pois nessa situação (curvas), diferentes cargas estão sobre as rodas, logo as forças laterais também variam, segundo o gráfico da Figura 16, onde: μ_{hf} – Coeficiente de atrito, μ_s – Coeficiente de força lateral.

Figura 16: Aderência \times deslizamento.



Fonte: Bosch (2018).

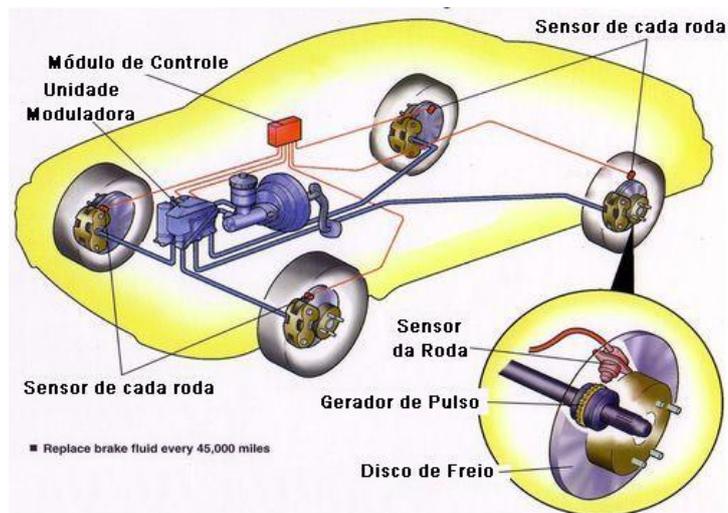
4.2 Apresentação de um Sistema Antibloqueio (ABS)

Um sistema antibloqueio é um sistema de controle realimentado que modula a pressão nos freios em resposta às medidas de desaceleração da roda, em regra para manter o controle das rodas evitando o bloqueio da mesma e perda de dirigibilidade do veículo (MORIGUSHI, 2010). Tipicamente, os sistemas antibloqueio consistem das seguintes partes:

- Sensores das rodas*: usualmente são componentes eletromagnéticos que fornecem um sinal digital com uma frequência proporcional a velocidade da roda;
- Unidade de controle eletrônico (ECU)*: dispositivo eletrônico responsável pelos cálculos para a geração de sinal de controle;

c) *Modulador de pressão de freio*: dispositivo eletro-hidráulico ou eletropneumático para reduzir, manter e armazenar pressão para os freios, independente do esforço no pedal aplicado pelo motorista. Para freios eletromagnéticos, um modulador de pressão de freio não é necessário. Diferente dos freios de fricção que tem uma atuação mecânica, os freios eletromagnéticos podem ser controlados por corrente elétrica. Portanto, o torque nos freios eletromagnéticos pode ser controlado através de um excitador de corrente. Um sistema de freios de fricção contém uma série de não linearidades.

Figura 17: Aspectos básicos do ABS.

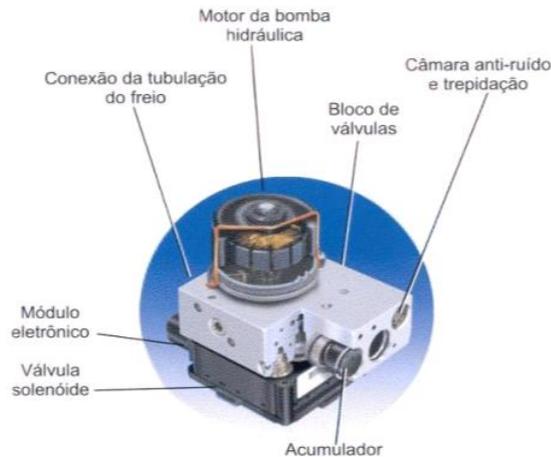


Fonte: Bosch (2018).

4.2.1 Modulador Hidráulico com Unidade de Comando Integrada.

Esse dispositivo é o responsável pela operação dos comandos da unidade, regular os freios por meio de válvulas solenoides e funcionar como uma ligação entre o cilindro mestre e os cilindros de roda. Fica instalado na parte de compartilhamento do motor (FUELTECH, 2017). A unidade do comando (Figura 18) assegura as tarefas elétricas e as funções de controle do sistema, trabalhando como atuador na saída do sistema.

Figura 18: Módulo elétrico com unidade hidráulica.



Fonte: Fueltech Ltda. (2017).

O freio eletromagnético pode ser modulado diretamente usando corrente elétrica. Por outro lado, um modulador de pressão pode também ser usado em um sistema de freios eletromagnético se quisermos usar um pedal de freio para controlar o torque nos freios ao invés de chavear o controle. Mas esta alternativa não é recomendada porque traz, sem necessidade, uma não linearidade para o sistema (OLIVI, 2014).

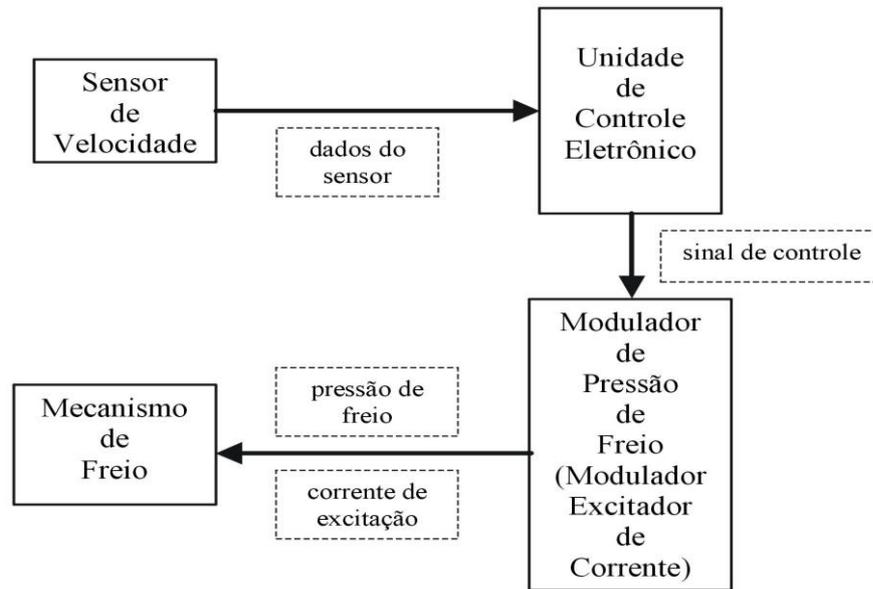
O sinal do sensor é enviado para a unidade de processamento (ECU). A unidade de controle monitora o modulador de pressão nos freios (ou o excitador de corrente) para modificar o torque nos freios. A habilidade do sistema antibloqueio para manter a estabilidade e a dirigibilidade e ainda produzir menores distâncias de parada, do que quando a roda é travada, vem do gráfico da Figura 16 (coeficiente de atrito versus deslizamento da roda) (Lima, 2005).

O coeficiente de atrito entre o pneu e pista tem um desempenho melhor quando o deslizamento da roda está entre 0.1 e 0.2, e tem pior desempenho quando a roda está travada (100% deslizamento). Um sistema antibloqueio tenta manter o deslizamento no valor ótimo para evitar o travamento da roda e paradas em curtas distâncias (OLIVI, 2014).

Ainda segundo Olivi (2014), o desempenho do sistema antibloqueio está diretamente relacionado com a manutenção do deslizamento da roda dentro de uma faixa ideal.

Lima (2005) explica que para um sistema de freio eletromagnético, o modulador de pressão pode ser substituído por um modulador excitador de corrente. O modulador excitador de corrente modifica o torque aplicado nos atuadores de freio.

Figura 19: Diagrama de blocos de um Sistema Antibloqueio



Fonte: Barros (2012).

4.3 Solenoide

O atuador solenoide utilizado é o “automático” geralmente acoplado ao motor de arranque dos veículos convencionais (Figura 20). Nada mais é do que uma bobina enrolada em um cilindro que tem um pistão em seu interior, quando a bobina é alimentada com a tensão apropriada, o campo eletromagnético criado puxa o êmbolo para dentro do cilindro. Neste trabalho se utilizarão dois atuadores solenoides, um para cada roda dianteira, visto que sua atuação na roda traseira não surtiria o momento angular necessário para correção da direção.

Figura 20: Atuador solenoide



Fonte: Autor (2018)

Todo o gerenciamento dos dados recebidos dos sensores e comandos que serão enviados para o atuador, ou seja, toda a administração do sistema é feita através da central eletrônica, trabalho este que será realizado pelo microprocessador Arduino.

No próximo capítulo se estudará os aspectos mais importantes da central eletrônica, no que diz respeito a este projeto.

5 CENTRAL ELETRÔNICA COM ARDUINO

Tecnicamente a placa Arduino pode ser definida como um pequeno computador que se pode programar para processar entradas e saídas entre o dispositivo e os componentes externos conectados a ele. Os componentes de entrada podem ser sensores, botões, potenciômetros, que podem ser conectados a entradas analógicas e/ou digitais. Os componentes de saída podem ser displays, led's, motores, cartões de memória entre outros componentes (MCROBERTS, 2011). A placa a ser utilizada no projeto será a Arduino UNO R3.

Para que se possa programar o Arduino, é necessária a utilização do seu IDE (Integrated Development Environment), ou seja, um ambiente integrado para desenvolvimento de software. O mesmo é responsável por receber o código na linguagem que o micro controlador compreende (baseado na linguagem C/C++) e transmiti-la para que o Arduino execute a ação programada (MOTA, 2016).

E ainda na IDE é que ocorre a rotina responsável por exibir ao usuário os dados que estão sendo coletados pelos sensores. Figura 21, placa do Arduino utilizada neste trabalho.

Figura 21: Placa Arduino Uno r3

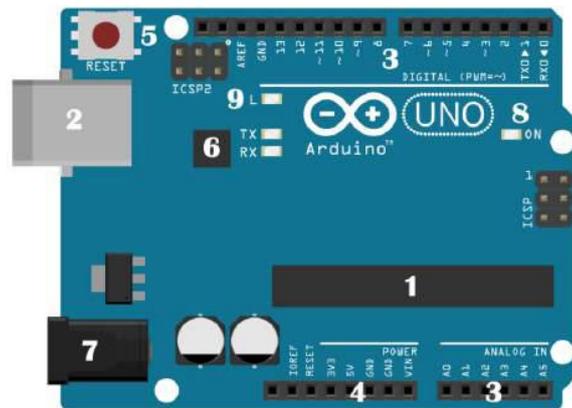


Fonte: Usina Info (2018).

5.1 O Arduino UNO

O hardware do Arduino é simples, porém muito eficiente. Analisar-se-á a partir desse momento o hardware do Arduino UNO. Conforme McRoberts (2011), ele é composto pelos seguintes blocos:

Figura 22: Hardware do Arduino.



Fonte: Mota (2016).

- a) **Microcontrolador (1):** O cérebro do Arduino. Um computador inteiro dentro de um pequeno chip. Este é o dispositivo programável que roda o código que se envia à placa. No mercado existem várias opções de marcas e modelos de micro controladores. A Arduino optou pelo uso dos chips da ATmel, a linha ATmega. O Arduino UNO usa o microcontrolador ATmega328;
- b) **Conector USB(2):** Conecta o Arduino ao computador. É por onde o computador e o Arduino se comunicam com o auxílio de um cabo USB, além de ser uma opção de alimentação da placa;
- c) **Pinos de Entrada e Saída (3):** Pinos que podem ser programados para agirem como entradas ou saídas fazendo com que o Arduino interaja com o meio externo. O Arduino UNO possui 14 portas digitais (I/O), 6 pinos de entrada analógica e 6 saídas analógicas (PWM – pulse with modulation);
- d) **Pinos de Alimentação (4):** Fornecem diversos valores de tensão que podem ser utilizados para energizar os componentes do seu projeto. Devem ser usados com cuidado, para que não sejam forçados a fornecer valores de corrente superiores ao suportado pela placa;
- e) **Botão de Reset (5):** Botão que reinicia a placa Arduino;
- f) **Conversor Serial-USB e Led's TX/RX (6):** Para que o computador e o microcontrolador conversem, é necessário que exista um chip que traduza as informações vindas de um para o outro. Os Led's TX e RX acendem quando o Arduino está transmitindo e recebendo dados pela porta serial respectivamente;
- g) **Conector de Alimentação (7):** Responsável por receber a energia de alimentação externa, que pode ter uma tensão de no mínimo 7V e no máximo 20V e uma corrente mínima de 300mA. Recomendamos 9V, com um pino redondo de 2,1mm e centro positivo. Caso a

placa também esteja sendo alimentada pelo cabo USB, ele dará preferência à fonte externa automaticamente;

h) LED de Alimentação (8): Indica se a placa está energizada;

i) LED Interno(9): LED conectado ao pino digital 13;

5.2 I.D.E Arduino

Quando tratar-se de software na plataforma Arduino, referir-se-á ao seu ambiente de desenvolvimento integrado IDE – Integrated Development Environment, onde se escreverá o programa desenvolvido para determinado fim e depois carregado na placa.

Uma das grandes vantagens dessa plataforma está no seu ambiente de desenvolvimento, que usa uma linguagem baseada no C/C++, linguagem bem difundida, usando uma estrutura simples (MCROBERTS, 2011).

Figura 23: Interface do IDE.

```

Blink | Arduino 1.6.13
File Edit Sketch Tools Help

Blink

// the setup function runs once when you press reset or power the board
void setup() {
  // initialize digital pin LED_BUILTIN as an output.
  pinMode(LED_BUILTIN, OUTPUT);
}

// the loop function runs over and over again forever
void loop() {
  digitalWrite(LED_BUILTIN, HIGH); // turn the LED on (HIGH is the voltage level)
  delay(1000); // wait for a second
  digitalWrite(LED_BUILTIN, LOW); // turn the LED off by making the voltage LOW
  delay(1000); // wait for a second
}

1 Pololu A-Star 32U4 on COM4

```

Fonte: MCRoberts (2011).

Em resumo, é uma interface simples de se utilizar e de entender com bibliotecas que podem ser facilmente encontradas na internet. As funções da IDE do Arduino são

basicamente três: permitir o desenvolvimento do software, de enviá-lo à placa para que possa ser executado e de interagir com a placa (MOTA, 2016).

Monta-se no próximo capítulo um estudo sobre a interface necessária entre todos os componentes do sistema, para o que se pretende para o funcionamento do projeto.

6 INTERFACES ARDUINO/SENSORES/ATUADOR

De posse do estudo feito na etapa anterior, inicia-se o desenvolvimento das interfaces do sistema.

6.1 Leitura das rodas

Como visto anteriormente, a placa Arduino uno possui 14 pinos de entrada e saída, nos quais se conectarão os sensores e atuadores do sistema de estabilidade eletrônica, usando as funções `pinmode()`, `digital write()` e `digitalread()`, que operam num range de 5V. Essas funções configuram cada pino como entrada ou saída e o caracteriza numa determinada posição, além de configurá-lo como leitor ou atuador, a depender de seu fim (MOTA, 2016).

Os sensores ABS a serem acoplados são sensores MVR – Relutância variável magnética – que emitem um sinal com uma amplitude que aumenta com a velocidade da roda. Neste caso haverá a necessidade de se usar algum circuito externo para acondicionar o sinal bruto a um pulso de nível TTL limpo (FUELTECK, 2018).

Esse tipo de sensor geralmente faz interface com um chip comparador para convertê-lo em sinal digital, que pode ser usado como sinal de entrada digital para a placa Arduino. Depois disso, basta medir sua frequência/período e na leitura desse sinal, usar-se-á a função `pulseInIn()` para ler e fazer a comparação da velocidade de cada roda (MOTA, 2016).

6.2 Leitura dos ângulos

Para a leitura dos ângulos, tanto do centro de massa do triciclo quanto o do sensor de direção usar-se-á o módulo acelerômetro e giroscópio MPU6050 (Figura 23).

O módulo acelerômetro e giroscópio MPU6050 é um componente de alta precisão que conta também com um sensor de temperatura. Controlado pelo CI MPU-6050, ele é um sensor de 6 eixos (6 DOF - Degrees of Freedom, ou 6 Graus de Liberdade), fornecendo 6 valores de saída, sendo 3 do acelerômetro e 3 do giroscópio (MOTA, 2016).

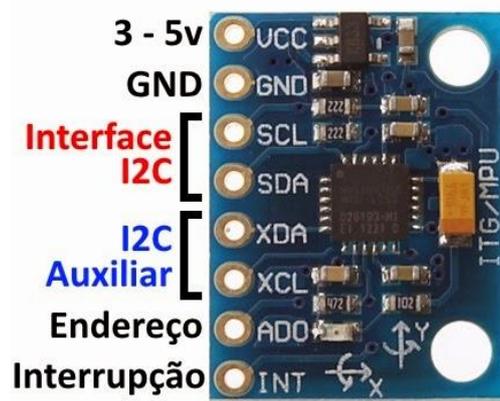
Segundo Mota 2016, esse CI tem um recurso chamado DMP (Digital Motion Processor), um acelerador de hardware que cuida da parte dos complexos cálculos do sensor.

Por ser um sensor de baixo custo, preciso e econômico em termos de consumo de energia, é ideal para projetos envolvendo robôs e simuladores, além é claro das aplicações em

dispositivos portáteis, como smartphones e tablets, projetos de realidade aumentada e monitoração de equipamentos, entre outras (MCROBERTS, 2011).

O módulo utiliza a comunicação via interface I2C, assim a conexão com o Arduino é bastante simplificada, utilizando apenas os pinos analógicos A4 (SDA) e A5 (SCL) e a alimentação, que pode variar entre 3 e 5V.

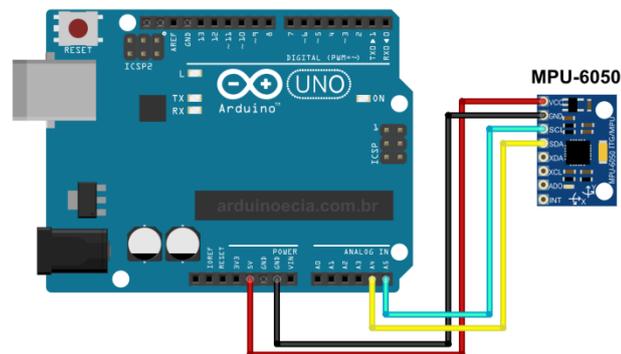
Figura 24: Módulo giroscópio MPU6050



Fonte: Mota (2016).

Os pinos XDA e XCL podem ser utilizados para ligação de outros dispositivos I2C ao módulo. Por meio do pino AD0 pode-se selecionar o endereço I2C: em nível baixo o endereço é 0x68, e em nível alto (3.3V), o endereço é 0x69 (MOTA, 2016).

Figura 25: Ligações Arduino/giroscópio.



Fonte: Mota (2016).

Para efetuar a leitura dos dados “puros” do sensor, deve-se carregar o programa registrado no Anexo A, no Arduino.

6.3 Interface com atuador

Para as ligações elétricas entre o atuador ABS e a placa Arduino será necessário um condicionador de tensão, pois a placa fornece 0V ou 5V no pino selecionado para a saída e o atuador necessita de 12V para atuar. Para tanto se utilizará o relê ASC0111064. Este módulo tem um relê padrão usado em conjunto com a placa de controle para fazer a interface com os circuitos elétricos ou outros módulos.

Algumas das aplicações mais comuns deste módulo com Arduino são: iluminação doméstica, aplicações elétricas de alta potência e outros equipamentos. O desenho modular facilita que este módulo seja utilizado com a placa de controle. O relê tem um LED de status e pode ser controlado através de um dos pinos digitais do Arduino (USINA INFO, 2018).

Figura 26: Relês de interface com o atuador.



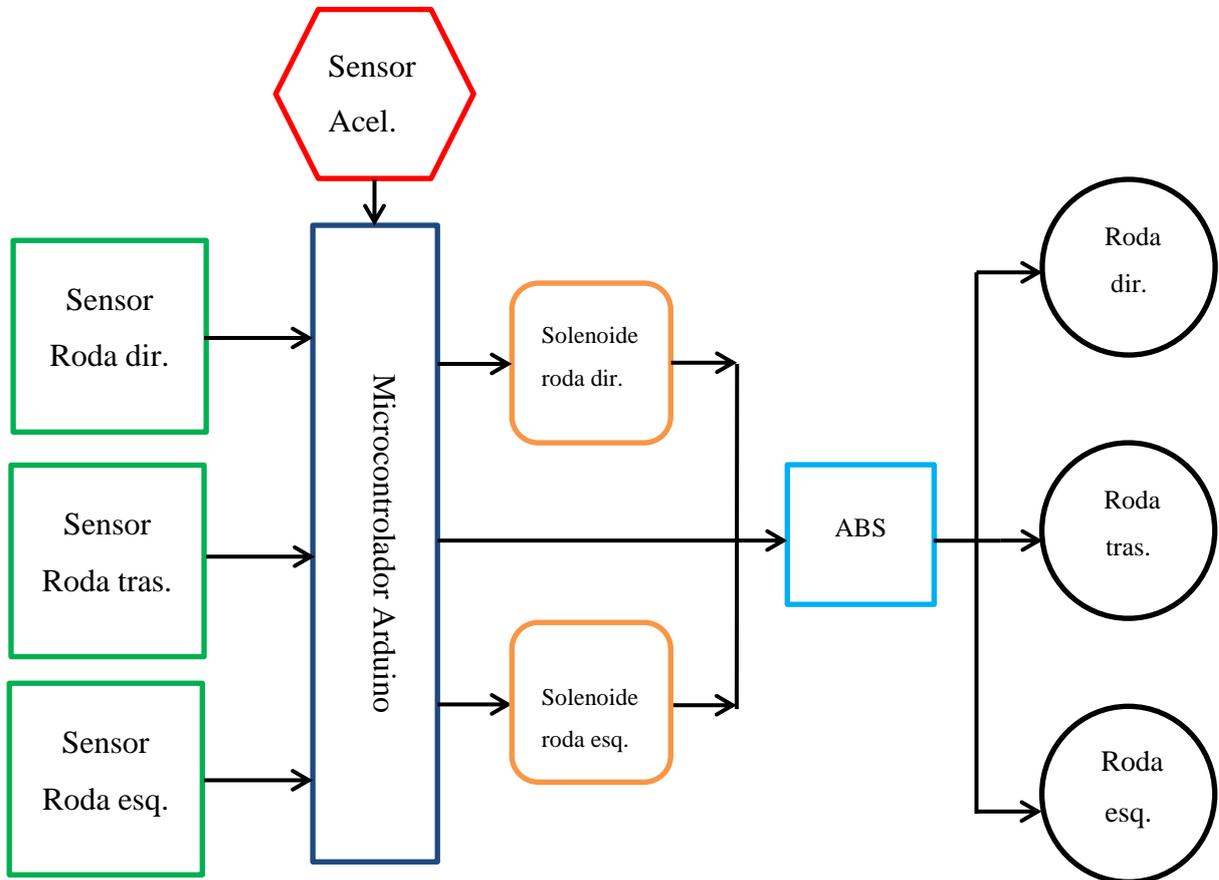
Fonte: Usina Info (2018).

Especificações:

- a) Placa com quatro relês;
- b) Corrente máxima: 10A (NO) 5A (NC);
- c) Interface: Digital;
- d) Sinal de controle: nível TTL;
- e) Voltagem máxima de chaveamento: 250V CA / 30V CC;
- f) Corrente máxima de chaveamento: 15^a;
- g) Potência máxima de chaveamento: 2770VA 240W ;
- h) Taxa UL: 10A 120V CA / 10A 277V CA;
- i) Tempo de operação (voltagem nominal): 10ms;
- j) Tempo de distensão (voltagem nominal): 5ms;

As interfaces do sistema, basicamente são as que estão na Figura 27.

Figura 27: Interfaces do sistema



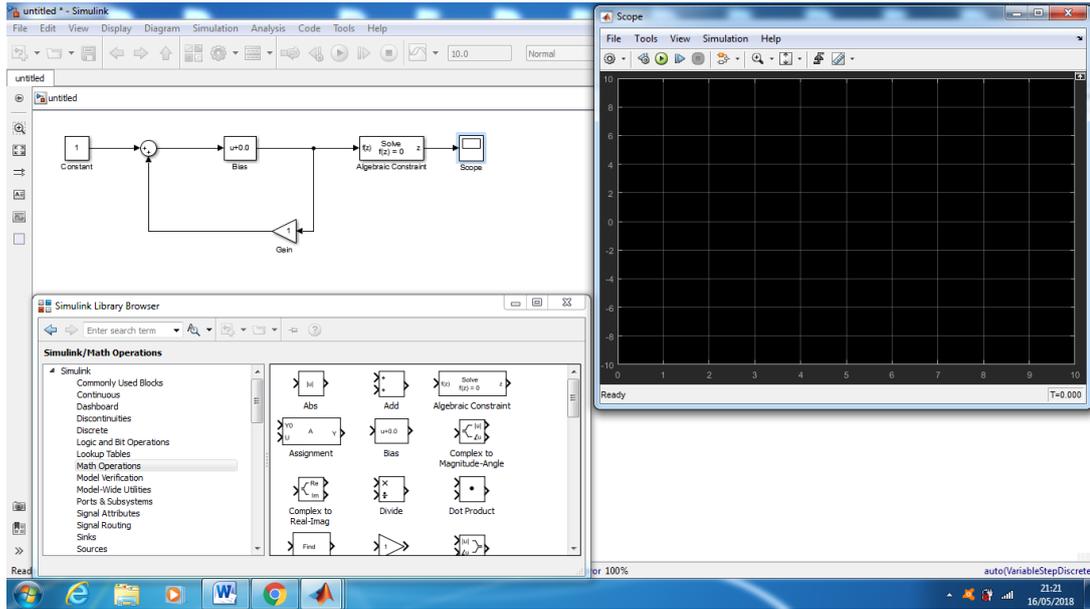
Fonte: Autor (2018).

Elaborados os aspectos físicos com relação a sensores e atuador e levantada a possível interface com a central eletrônica, é necessário que se faça as devidas simulações computacionais, a fim de se comprovar a ação do controle.

7 MODELAGENS COMPUTACIONAIS

Para simulação desse sistema será utilizado software Simulink constante do pacote Matlab de softwares, por ser um software robusto e possuir recursos suficientes para tal empreitada.

Figura 28: Interface do Simulink.



Fonte: Autor (2018).

Em princípio é necessário que se defina um setpoint, ou seja, um valor que se considere como ideal para o referido controle. Partindo do princípio que a taxa de yaw desejável é retirada da equação:

$$\phi_{des} = \frac{x\delta}{L + \frac{mx^2l_r C_{\alpha r} - l_f C_{\alpha r}}{2C_{\alpha r} C_{\alpha f} L}} \text{ rad/s} \quad (11)$$

Onde já se foram definidas todas as constantes e variáveis, então é dela que se deverá tirar os parâmetros de setpoint para se definir o erro. Para tanto se partirá de uma situação criada hipoteticamente, com velocidades e escorregamentos aleatórios e a partir de então visualizar os resultados.

Para uma situação ideal, as taxas de escorregamento lateral não são desejáveis, então as variáveis $C_{\alpha r}$ e $C_{\alpha f}$ devem ser nulas. As constantes que são características do triciclo são:

Massa (m), distância entre eixo dianteiro e roda traseira (L), distâncias entre o centro de massa e roda traseira (l_r) e eixo dianteiro (l_f).

$$m = 300 \text{ kg}$$

$$L = 2 \text{ m}$$

$$l_r = 1.65 \text{ m}$$

$$l_f = 0.35 \text{ m}$$

Então, para esta experiência, as seguintes variáveis terão valores atribuídos aleatoriamente: velocidade longitudinal (x), ângulo de esterçamento (δ) e escorregamentos laterais ($C_{\alpha r}$ e $C_{\alpha f}$).

$$x = 60 \text{ km/h}$$

$$\delta = 0.5236 \text{ rad}$$

$$C_{\alpha r} = 0$$

$$C_{\alpha f} = 0$$

Então nesta situação (ideal) o setpoint será:

$$\phi_{des} = \frac{60 \times 0.5236}{2 + \frac{300 \times 60^2 \times 0.35 \times 0 - 1.65 \times 0}{2 \times 0 \times 0 \times 2}} \text{ rad/s}$$

$$\phi_{des} = 15.708 \text{ rad/s}$$

E para a comparação supõem-se os valores reais (situação real com escorregamento lateral):

$$x = 60 \text{ km/h}$$

$$\delta = 0.5236 \text{ rad}$$

$$C_{\alpha r} = 0.4 \text{ rad}$$

$$C_{\alpha f} = 0.5 \text{ rad}$$

Então, com estes parâmetros a taxa real de variação yaw será:

$$\phi_{des} = \frac{60 \times 0.5236}{2 + \frac{300 \times 60^2 \times 0.35 \times 0.4 - 1.65 \times 0.5}{2 \times 0.4 \times 0.5 \times 2}} \text{ rad/s}$$

$$\phi_{des} = 0.00017 \text{ rad/s}$$

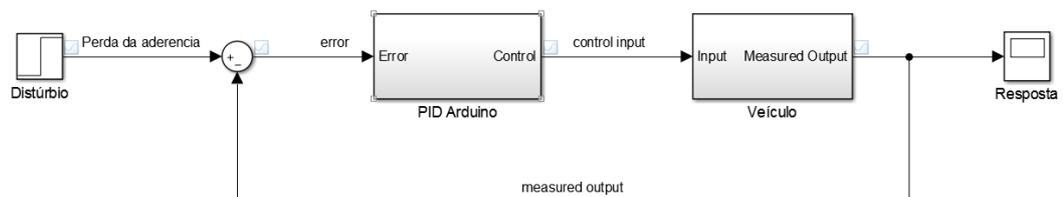
Nota-se que na realidade o veículo teve uma taxa de yaw muito pequena, ou seja, quase não variou de direção, dessa maneira não fazendo a curva, o que se chama de sub-esterçamento. Deve-se implementar, então, o controle na simulação Simulink, afim de se verificar os resultados (A Equação 11 é utilizada apenas para descobrir valores da taxa de variação da velocidade angular, não sendo implementada no Simulink).

Desde que a leitura de ϕ_{des} tem que ser de preferência igual nos sensores, então a diferença na leitura tem que ser mínima – isso se resolve na escrita do algoritmo, quando se tiver com a IDE do Arduino – entretanto para a simulação, pode-se considerar esta diferença como nula e traçar uma linha de controle com um sinal em degrau para simular o distúrbio, neste caso, a perda de aderência da alguma roda.

Utilizando-se do controle PID do Arduino em conjunto com a planta, neste caso, o próprio veículo, para restaurar a trajetória – intensão inicial do piloto - só que agora modificada de uma amplitude desconhecida (Configuração no Simulink – Figura 29).

Simulando uma curva de 6s para ser completada, cria-se um distúrbio em $t=3s$ e verifica-se a atuação do controle – que será implementado na IDE do Arduino.

Figura 29: Diagrama de blocos Simulink



Fonte: Autor (2018).

Baseando-se na equação (10), consideraram-se os ganhos:

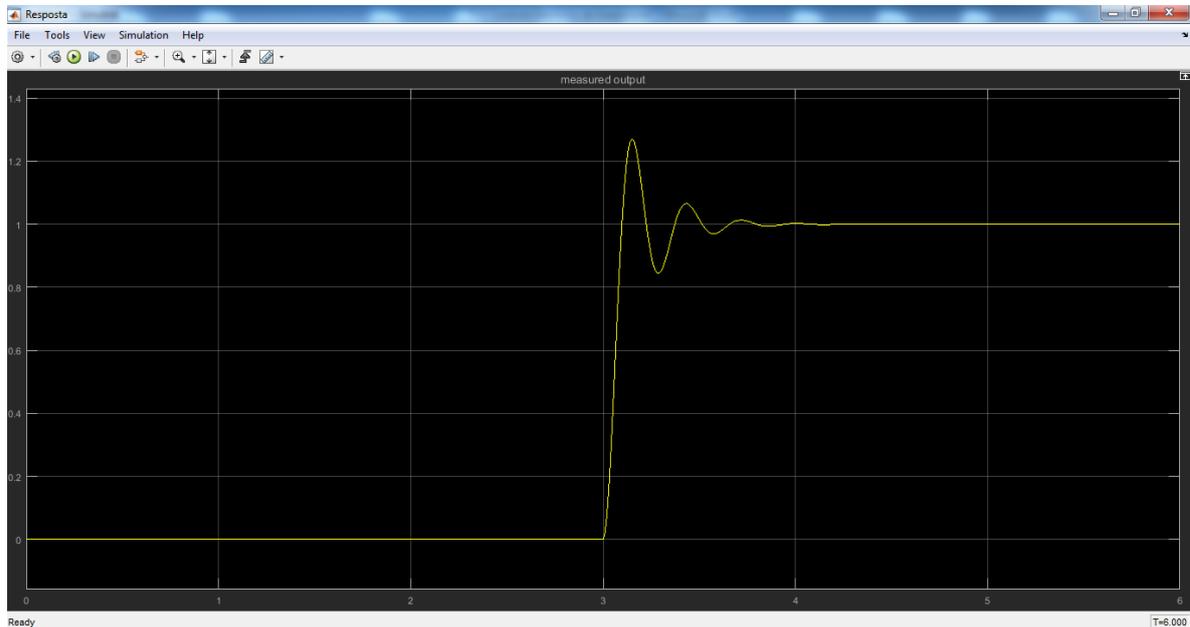
$$K_p = 1.2$$

$$K_i = 22$$

$$K_d = 0.02$$

Resposta:

Figura 30: Gráfico da resposta



Fonte: Autor (2018).

Percebe-se na Figura 30, que no evento (curva) de 6s, o sistema demora 1s para restabelecer o controle, com um overshoot de 0,20. Considerando esta primeira tentativa, pouco satisfatória, pode-se modificar os parâmetros dos ganhos K_p , K_i e K_d , na tentativa de melhorar o tempo de resposta.

Utilizando-se do recurso 'Block Parameters' do Simulink para otimizar os resultados, consegue-se valores mais adequados para os ganhos:

$$K_p = 1.99941960768909$$

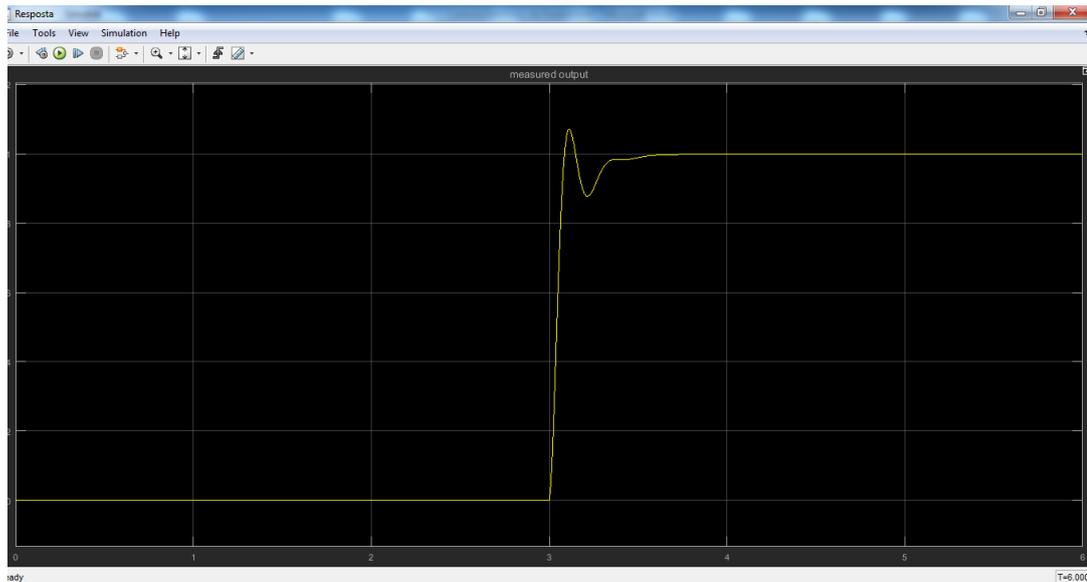
$$K_i = 16.891975386118$$

$$K_d = 0.0383138045264239$$

Com estes novos parâmetros, se procederá a uma segunda tentativa a fim de se melhorar o resultado.

Na Figura 31 percebe-se desta vez, uma melhoria no tempo de resposta, que cai para 400 ms de acomodação e overshoot de 0,25, demonstrando com esta simulação que mesmo com uma taxa de yaw modificada, representada aqui pelo sinal em degrau, que é possível com a ação do PID a retomada do controle do veículo.

Figura 31: Gráfico 2ª tentativa

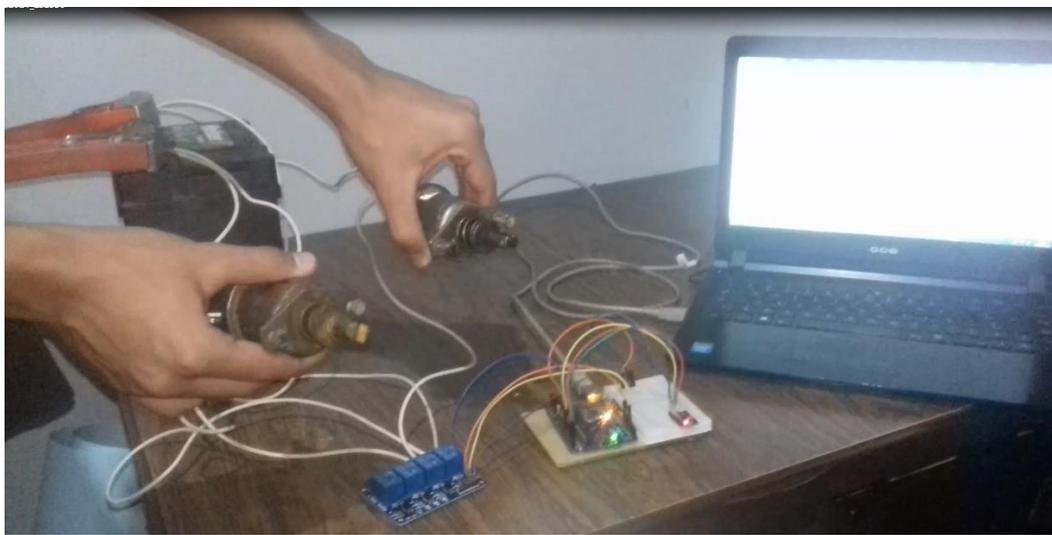


Fonte: Autor (2018)

Baseado nesta simulação escreve-se o algoritmo (Anexo A), onde se estabeleceu um set point de variação da velocidade angular considerada segura para os parâmetros do triciclo (Range de 3000 para mais ou para menos será considerado distúrbio pelo Arduino – últimas 6 linhas do código) e que irá realmente controlar o sistema carregado na placa microcontroladora.

Construiu-se para a simulação de uma curva real e teste de bancada, o modelo da Figura 32, a fim de se testar reles, placa, atuadores e ajuste do algoritmo, comprovando o funcionamento dos atuadores.

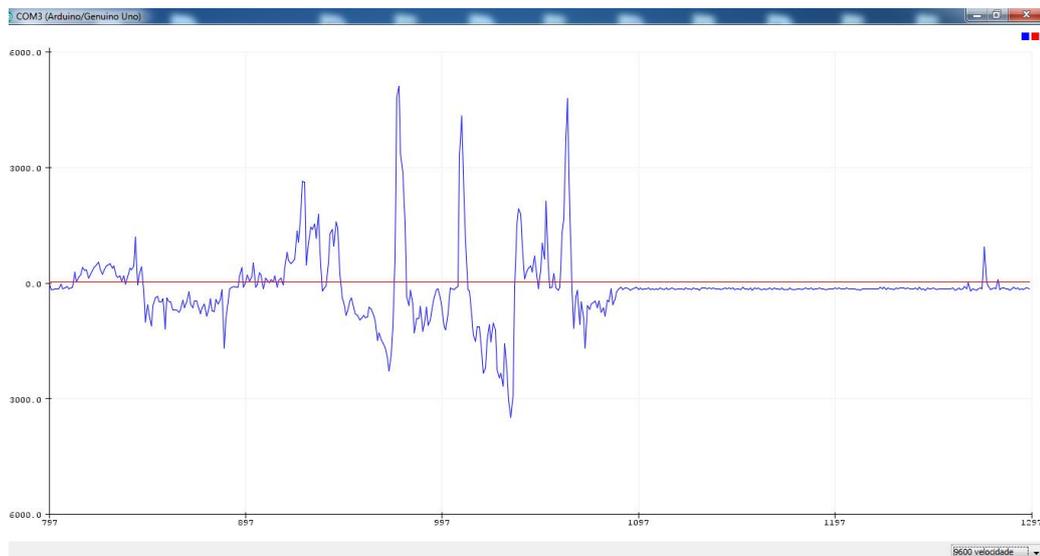
Figura 32: Testes de bancada para simulação de uma curva real



Fonte: Autor (2018)

Na Figura 33 está o supervisor do MPU6050 que registra a taxa de variação do eixo Z em tempo real, ou seja, a orientação yaw do triciclo, demonstrando curvas dentro e fora do valor aceitável (Range de 3000 para mais ou para menos), de acordo com o algoritmo, registradas pelos sensores durante a simulação e demonstrando o funcionamento do controle.

Figura 33: Gráfico do sensor MPU 6050 durante a simulação



Fonte: Autor (2018)

Como se pode perceber através do gráfico do supervisor em tempo real é que de fato o MPU6050 registra a taxa de variação da velocidade angular, nesse caso do eixo Z. Os distúrbios são em forma de impulso e não em degrau. Com isso pode-se estabelecer um padrão dito aceitável para o comportamento do triciclo, conforme Equação 11 estabelecendo um limite de variação, acima da qual o controle deve atuar, para que se execute uma curva com variação da velocidade angular segura.

Para a comparação da simulação realizada através do Simulink e do serial plotter do Arduino e o que se pode obter de real num teste de campo, se partirá nesta próxima etapa para a construção do protótipo do triciclo e posterior ajuste do set point.

8 TESTES

Após terem sido feitas as pesquisas bibliográficas, as modelagens matemáticas e referentes simulações, partiu-se para a adaptação do protótipo mecânico a fim de se ajustar os controles eletrônicos para os devidos testes de campo.

Pretende-se com isso comprovar ou aprimorar os testes computacionais anteriormente simulados e verificar se há ou não necessidade de se modificar os algoritmos.

Não se entrará em detalhes da construção mecânica por não ser este o foco deste trabalho, entretanto, na etapa de adaptação e arranjo dos sensores e atuadores se dará a devida atenção e acompanhamento dos detalhes, afim de que se façam os testes de campo e relatório de comparação.

Segue na Figura 34 o atual estágio de construção do protótipo:

Figura 34: Construção do protótipo



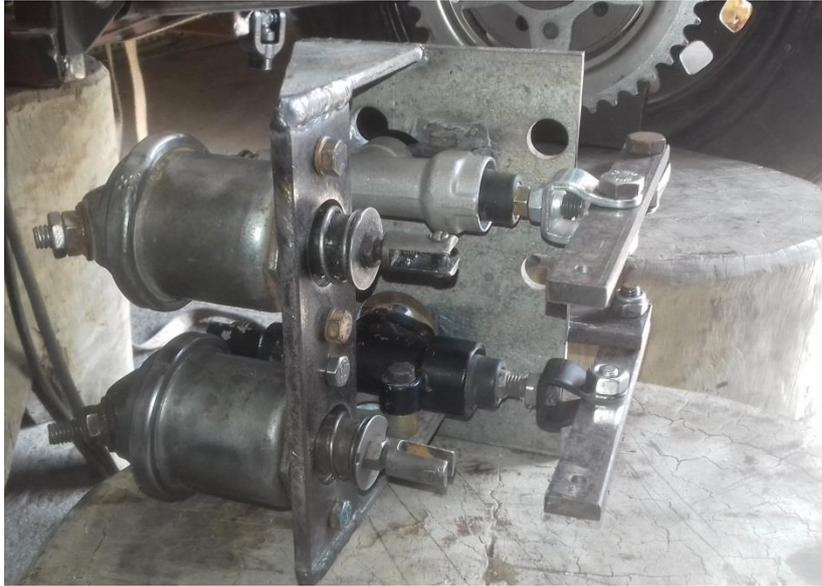
Fonte: Autor (2018).

8.1 Adaptação dos atuadores e sensor

Foi construído um arranjo mecânico para a adaptação dos solenoides aos cilindros de freio que atuarão nas rodas dianteiras conforme Figura 35.

Procurou-se fixar o sensor MPU6050 no ponto mais próximo possível do centro de massa do triciclo para então fazer os ajustes e testes do algoritmo a fim de se verificar o gráfico supervisor (Figura 36).

Figura 35: Arranjo dos atuadores com cilindros de freio



Fonte: Autor (2018)

Figura 36: Fixação dos atuadores e sensor



Fonte: Autor (2018)

Após adaptação e ajuste dos atuadores solenoides e cilindros de freio e fixação do sensor, efetuaram-se os testes de funcionamento do sistema de controle. Dentro do que foi estabelecido como set point de uma curva com variação da velocidade angular segura, o sistema atuou satisfatoriamente acionando os atuadores esquerdo e direito do sistema de freios eletro-hidráulicos vistos na Figura 36.

8.2 Adaptação do ABS

Foram realizados exaustivos testes com o módulo elétrico e unidade hidráulica do atuador ABS e sensores de rotação das rodas conforme Figura 37, entretanto o comportamento do dispositivo não foi conforme esperado, exigindo um número considerável de tentativas sem, contudo, obter uma resposta satisfatória do sistema, que seria uma retaguarda de segurança, no caso dos solenoides ou o freio convencional travarem as rodas.

Figura 37: Testes do módulo ABS



Fonte: Autor (2018)

Como parte da tentativa de se solucionar o problema, foram analisados vários diagramas elétricos do sistema ABS colocados no Anexo B no final deste trabalho. O controle eletrônico, portanto, atua segundo o algoritmo definido, porém sem a retaguarda do ABS.

Exige-se a partir deste problema a necessidade de se considerar este como um ponto de continuidade da pesquisa, revendo diagramas e interfaces elétricas e hidráulicas bem como a utilização de outros sensores.

9 CONCLUSÕES

Após intensa pesquisa nas diversas referências bibliográficas relacionadas ao projeto em questão, assim como simulações, programas, arranjos elétricos e mecânicos e testes, mesmo com a construção do protótipo ainda em andamento, este trabalho demonstra o desenvolvimento de um dispositivo eletrônico capaz de otimizar, juntamente com outros dispositivos já existentes, a segurança no transporte de passageiros – neste caso em especial, no transporte de um cadeirante.

Ainda nos dias atuais, milhões de pessoas perdem a vida ou saem feridas de acidentes de trânsito, todos os dias, no mundo todo. Fica evidente, portanto, que há necessidade do engajamento da comunidade científica e dos engenheiros das mais variadas áreas no que tange a busca da melhoria da segurança no transporte de passageiros.

Mesmo com o surgimento de pontos de continuidade deste projeto, o presente demonstrou que é possível, a um custo muito reduzido, desenvolver um equipamento capaz de aumentar em potencial a segurança do veículo, visto que todos os dispositivos até aqui utilizados, tanto os eletrônicos quanto eletromecânicos, são de fácil aquisição e baixíssimo custo, hoje no mercado.

Comprovou-se o funcionamento do controle eletrônico de estabilidade utilizando a plataforma Arduino como sistema de controle embarcado, utilizando-se facilmente de suas bibliotecas e Shields, provando a importância na atualidade dos sistemas open-source. E ainda o efetivo funcionamento do sistema, evitando derrapagens que estejam acima do valor especificado no algoritmo que se implementou, evitando assim a perda de controle do veículo e os acidentes advindos de tal situação.

Não foi possível realizar os testes de campo devido ao atraso na construção do protótipo e também falha no sistema ABS, criando a necessidade de pontos de continuidade do trabalho. Não fica evidenciado, portanto, que o sistema funcione como num veículo de quatro rodas, pois as quantidades de massas envolvidas para se criar o momento angular são diferentes com uma ou duas rodas traseiras. Pressupõe-se que no teste de campo não haverá correção da perda da estabilidade por sub-esterçamento. Mas haverá correção por sobre-esterçamento e giro indesejado do veículo.

Além do apelo social com este estudo, também foi possível verificar e confirmar o conhecimento e habilidades adquiridos durante o curso de bacharel em engenharia elétrica, expondo o autor a uma situação de resolução de problema, presente no dia-dia da sociedade.

9.1 Pontos de Continuidade do Trabalho

- a) Desenvolver a interface ABS/Arduino como um sistema único de controle, evitando problemas de compatibilidade e de danos nas placas eletrônicas, podendo adquirir qualquer unidade ABS do mercado, reduzindo custos;
- b) Desenvolver dentro da plataforma Simulink diagramas de blocos que utilizem variáveis de estado capazes de simular o triciclo como um todo bem como as velocidades e ângulos de esterçamento envolvidos no sistema, criando um supervisor mais robusto e portanto um controle mais robusto;
- c) Realizar os testes de campo a fim de se comparar os resultados obtidos nas simulações.

REFERÊNCIAS

ALFA SOLUÇÕES TÉRMICAS, **Equipamentos Industriais**. Disponível em: <<http://www.alfasolterm.com.br/control>> Acesso em: 30/09/2018.

ALVARENGA, Alice; CRUZ, Pâmilla Barcelos da. **Desenvolvimento e sintonia de controladores PID para uma planta experimental de nível**. Monografia apresentada ao Instituto Federal Fluminense para conclusão do curso de engenharia de controle e automação. 2011.

BARROS, Wagner Rocha; **Sistema de automação veicular com Arduino e android**. Trabalho de conclusão de curso do Centro Universitário Adventista de São Paulo do curso de tecnólogo em sistemas para internet, 2012.

B. HEDENETZ E R. BELSCHNER. **Freio-por-fio sem reforço mecânico usando uma rede de comunicação**, 1998. In: SAE International Congress and Exhibition, Detroit. Disponível em: <<http://www.sae.org/news/press-room/2018/03/smart-cities-autonomous-vehicles>> Acesso em: 18/04/2018.

BISHOP, Robert H. **Sistemas de Controle Modernos**. 8ª Edição. Pearson, 2001.

BOSCH, **Soluções Bosch Brasil para mobilidade**. Disponível em: <https://www.bosch-mobility-solutions.com.br/br/destaques/mobilidadeaut%C3%B4noma/motocicletaabs/>. Acesso em: 15/08/2018.

DIRECT INDUSTRY, **Equipamentos Industriais**. Disponível em: <<http://www.directindustry.com/pt/tab/controladores>> Acesso em: 27/08/2018.

FUELTECH EQUIPAMENTOS, **Injeção, Ignição e Controles**. Disponível em: <<http://www.fueltech.com.br>>. Acesso em: 29 de maio de 2018.

KELBER, Christian R., Cláudio R. Jung, Farlei Heinen Computação Embarcada; **Projeto e Implementação de Veículos Autônomos Inteligentes**. XXV Congresso da SBC, 2005.

LIMA, J. J. B. **Sistema antibloqueio (ABS) para freios eletromecânicos utilizando controle por modos deslizantes**. Tese apresentada ao COPPE/UFRJ para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil, 2005.

MCRBERTS, Michael. **Arduino Básico**. 2ª edição. Editora Novatec, 2011.

MORIGUCHI, Sérgio Kenji. **Controle de estabilidade por frenagem diferencial para veículo automotor**. Artigo de Iniciação Científica da Escola de Engenharia Mauá (EEM/CEUM-IMT), 2010.

MOTA, Allan. **Apostila Arduino Básico Volume I, II e III**. Vida de Silício Revista Eletrônica. Disponível em: <<http://www.vidadesilicio.com.br>> Acesso em 05/03/2018..

OFICINA BRASIL, **Diagramas de injeção**. Disponível em: <<http://www.oficinabrasil.com.br/diagramas.html>>. Acesso em 07/04/2018.

OGATA, Katsuhiko, **Engenharia de Controle Moderno**. 5ª Edição, Pearson, 2010.

OLIVI, Rafael Wentzcovitch. **Estudo sobre o funcionamento de sistema de controle de tração em veículos automotores**. Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Mecânica. Guaratinguetá, 2014.

PEREIRA, Anderson Maciel. **Acessibilidade – Triciclo para cadeirante**. Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Mecânica do Centro Universitário do Sul de Minas UNIS-MG, 2016.

SAE. **Anti-lock Brake System Review**. Tech. Rep., Technical Report J2246, Society of Automotive Engineers, Warrendale PA. 1992

TRW AUTO, **Electronic Stability Control**, from TRW Automotive. Disponível em: <<http://www.trwauto.com/extlink.html>>. Acesso em 25 de outubro de 2017.

USINA INFO, **materiais eletrônicos**. Disponível em: <<http://www.usinainfo.com.br/placas-microcontroladoras.html>>. Acesso em 07/04/2018.

ANEXO A

Programa para a leitura dos dados do sensor MPU6050 e comando dos atuadores

```
//Programa : Teste MPU-6050
//Carrega a biblioteca Wire
#include<Wire.h>

//Endereco I2C do MPU6050
const int MPU=0x68;

//Variaveis para armazenar valores dos sensores
int AcX,AcY,AcZ,Tmp,GyX,GyY,GyZ;
#define pin1 4
#define pin2 7
void setup()
{
  Serial.begin(9600);
  Wire.begin();
  Wire.beginTransmission(MPU);
  Wire.write(0x6B);

  //Inicializa o MPU-6050
  Wire.write(0);
  Wire.endTransmission(true);
  pinMode( pin1, OUTPUT);
  pinMode( pin2, OUTPUT);
}

void loop()
{
  Wire.beginTransmission(MPU);
  Wire.write(0x3B); // starting with register 0x3B (ACCEL_XOUT_H)
  Wire.endTransmission(false);

  //Solicita os dados do sensor
  Wire.requestFrom(MPU,14,true);

  //Armazena o valor dos sensores nas variaveis correspondentes
  AcX=Wire.read()<<8|Wire.read(); //0x3B (ACCEL_XOUT_H) & 0x3C
  (ACCEL_XOUT_L)
  AcY=Wire.read()<<8|Wire.read(); //0x3D (ACCEL_YOUT_H) & 0x3E
  (ACCEL_YOUT_L)
  AcZ=Wire.read()<<8|Wire.read(); //0x3F (ACCEL_ZOUT_H) & 0x40 (ACCEL_ZOUT_L)
  Tmp=Wire.read()<<8|Wire.read(); //0x41 (TEMP_OUT_H) & 0x42 (TEMP_OUT_L)
  GyX=Wire.read()<<8|Wire.read(); //0x43 (GYRO_XOUT_H) & 0x44 (GYRO_XOUT_L)
  GyY=Wire.read()<<8|Wire.read(); //0x45 (GYRO_YOUT_H) & 0x46 (GYRO_YOUT_L)
  GyZ=Wire.read()<<8|Wire.read(); //0x47 (GYRO_ZOUT_H) & 0x48 (GYRO_ZOUT_L)
```

```
//Mostra os valores na serial
Serial.print("Acel. X = "); Serial.print(AcX);
//Serial.print(" | Y = "); Serial.print(AcY);
//Serial.print(" | Z = "); Serial.print(AcZ);
//Serial.print(" | Gir. X = "); Serial.print(GyX);
// Serial.print(" | Y = "); Serial.print(GyY);
Serial.print(" | Z = "); Serial.print(GyZ);
Serial.print(" | Temp = "); Serial.println(Tmp/340.00+36.53);

//Aguarda 100 ms e reinicia o processo
delay(100);

//Programa : Teste rele
//Alteracoes e adaptacoes : Arduino e Cia

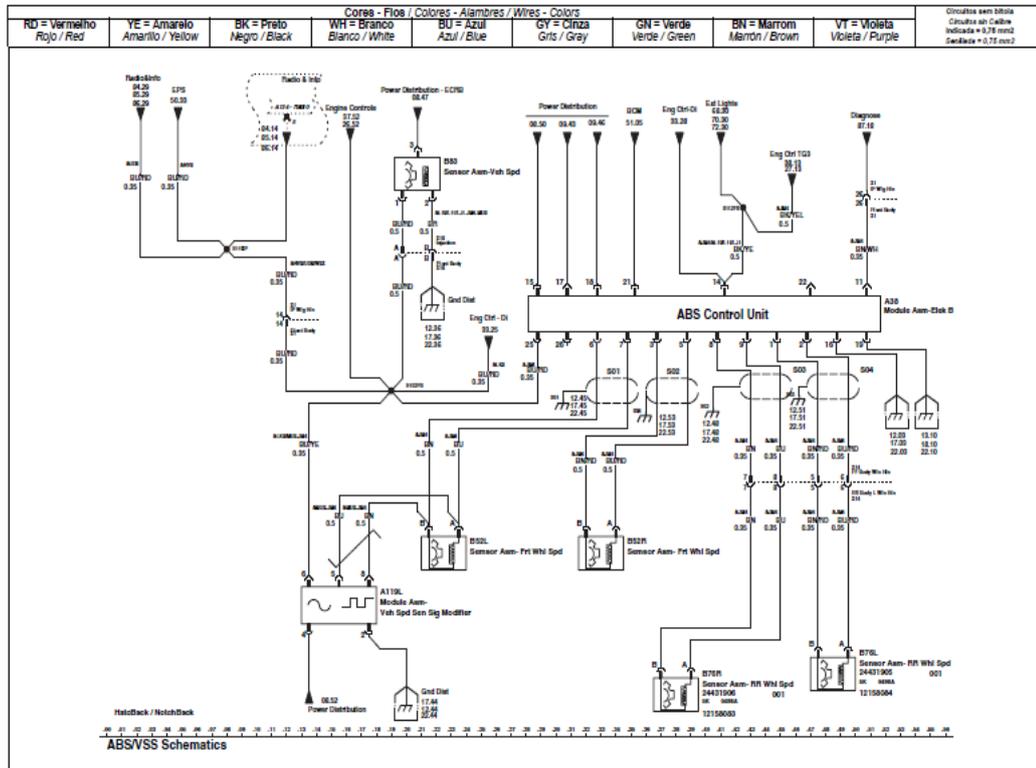
if (GyZ > 3000) {
  digitalWrite( pin1, LOW); //Freia a roda direita
} else if (GyZ < -3000){
  digitalWrite( pin2, LOW); //Freia a roda esquerda
} else {
  digitalWrite( pin1, HIGH);
  digitalWrite( pin2, HIGH);
}
}
```

Fonte: Adaptado de McRoberts (2011)

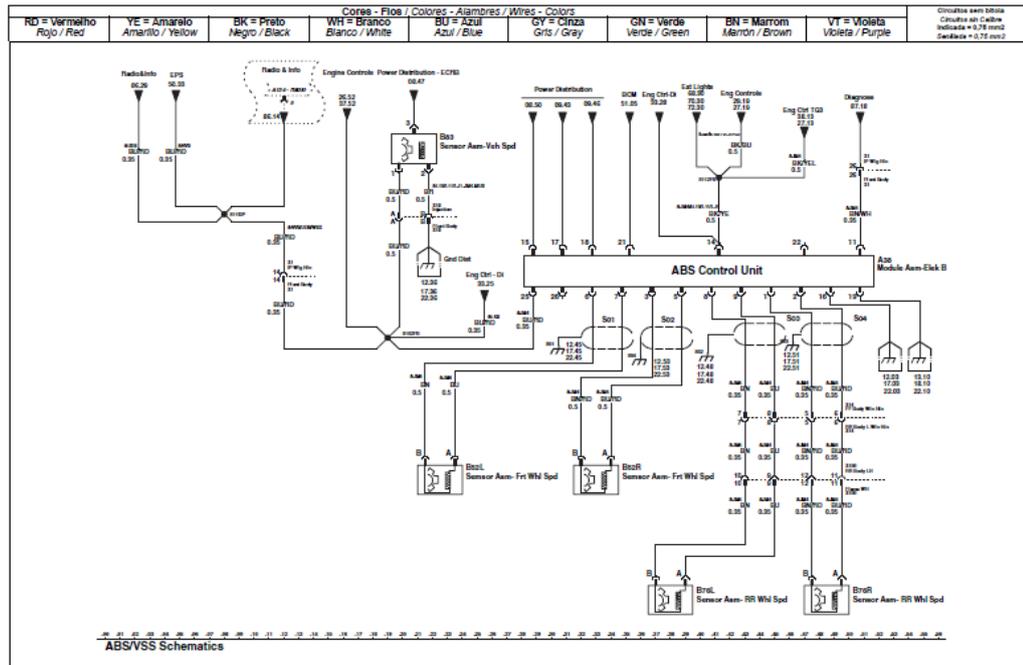
ANEXO B

Diagramas elétricos do sistema ABS

Sistema Freio ABS / Sensor Veloc. Veículo - Hatchback - Notchback



Sistema Freio ABS / Sensor Veloc. Veículo - Hatchback - Notchback



Fonte: Bosch (2018)