

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE  
CURSO DE ENGENHARIA AUTOMOTIVA

MARCO ANTÔNIO ZOLETT ROSSO

DESENVOLVIMENTO DO CONTROLE ELETRÔNICO DO ACELERADOR

Joinville  
2017

MARCO ANTÔNIO ZOLETT ROSSO

DESENVOLVIMENTO DO CONTROLE ELETRÔNICO DO ACELERADOR

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Automotiva, no curso Engenharia Automotiva da Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville.

Orientador: Dr. Gian Ricardo Berkenbrock

Joinville  
2017

## RESUMO

O controle eletrônico do acelerador (ETC), baseia-se no conceito de *drive-by-wire* para melhorar o desempenho e eficiência de veículos propelidos por motor de combustão interna. Esse sistema embarcado consiste na substituição do sistema de atuação direta, acionado mecanicamente via cabo, por um sistema eletrônico que interpreta a ação do condutor no pedal do acelerador, processa e atua sobre corpo do acelerador (TBI) do veículo. A integração da eletrônica aos sistemas veiculares permite que novos recursos sejam implementados, tais como sistema de controle de tração, sistema anti travamento dos freio e veículos autônomos. Deste modo, este trabalho propõem como principal objetivo, desenvolver um sistema de controle eletrônico para o acelerador de um motor de combustão interna, estabelecendo como requisitos a conformidade com regulamento da competição formula SAE e uma operação com uma boa resposta. Para isto será apresentada uma revisão sobre o funcionamento do conjunto, um levantamento de requisitos do sistema, o projeto do software e do hardware, a implementação do sistema em bancada, teste de funcionalidades e avaliação do desempenho da operação do controlador. Os resultados mostram o atendimento parcial dos requisitos propostos pelo regulamento, o funcionamento da bancada e sua capacidade de testar o sistema. E a comparação do sistema com e sem controle, onde há redução no tempo de atraso e aumento na precisão com a utilização de um controle PI.

**Palavras-chave:** Controle eletrônico do acelerador, Motor de combustão interna, Formula SAE.

## ABSTRACT

The electronic throttle control (ETC), is based on the drive-by-wire concept to enhance the performance and efficiency of vehicles propelled by internal combustion engine. That system consists on replacing the direct actuation system, done by steel cable, for an electronic one that measure the action of the driver over the gas pedal, process and acts on the throttle body intake (TBI) of the vehicle. The integration of the electronics to the veicular systems allow new features to be implemented, such as tractive control, anti-block brake system and autonomous vehicles. This work has the propose, as the main goal, to develop a electronic throttle control system for an internal combustion engine, defining its operation requirements according to Formula SAE competition rules with a good actuation. In order to address the results, it will be presented a review about the system operation, the requirements, development of software and hardware, implementation of a workbench with the system, test, and analysis the performance of the controller. The results shown the partial delivery of the requirements, the functionalities of the workbench for testing the system. And the comparison between the systems with and without control, where reaches reduction of delay time and increasing of the accuracy applying a PI controller.

**Keywords:** Electronic throttle controller, Internal combustion engine, Formula SAE.

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus pela realização desse trabalho.

A meu orientador, professor Gian Ricardo Berkenbrock, pelo seu apoio e sugestões no desenvolvimento e conclusão deste trabalho.

Agradeço aos colegas do laboratório de sistemas embarcados Felipe, Thiago e Breno pelas incontáveis sugestões e ajuda no desenvolvimento deste trabalho.

A meus pais Roberto José e Valci Sofia por seu apoio e incentivo durante toda a graduação. Suas palavras foram fundamentais para que eu chegasse a este momento.

A minha irmã Cristine e meu cunhado Jorge pela amizade e por me acompanharem durante toda a graduação e durante este trabalho.

Agradeço a minha namorada Ana Carolina pelo companheirismo durante o desenvolvimento deste trabalho. Pelo suporte, interesse e pelas correções.

Agradeço a equipe Fórmula CEM onde tive muitas possibilidades e aprendizados. Aos amigos professor Modesto e colegas Rafael, Lucas, Bruno, Alan, Pedro e Jorge pela amizade e contribuições para o projeto. Sou muito feliz por estar na história da equipe.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Diagrama P-V do ciclo Otto. . . . .	13
Figura 2 – Fluxo de de ar no ciclo de admissão. . . . .	14
Figura 3 – Representação da comunicação do sistema com ETC. . . . .	15
Figura 4 – Diagrama de blocos. . . . .	18
Figura 5 – Sistema de segunda ordem . . . . .	20
Figura 6 – Resposta de um sistema de segunda ordem. . . . .	21
Figura 7 – Estrutura da mensagem CAN . . . . .	24
Figura 8 – Barramento CAN . . . . .	25
Figura 9 – Hercules RM42x Kit de Desenvolvimento. . . . .	32
Figura 10 – Componentes electromecânicos. . . . .	33
Figura 11 – Diagrama esquemático da ligação elétrica dos componentes. . . . .	35
Figura 12 – Fluxograma de esboço dos processos no microcontrolador 1. . . . .	36
Figura 13 – Fluxograma de esboço dos processos no microcontrolador 2. . . . .	37
Figura 14 – Bancada de teste para ETC. . . . .	38
Figura 15 – Resposta dos sensores do pedal do acelerador ao deslocamento do pedal. . . . .	39
Figura 16 – Resposta dos sensores de posição da válvula do acelerador ao movimento angular da válvula. . . . .	39
Figura 17 – Planta TBI. . . . .	40
Figura 18 – Comportamento de sensores para uma entrada senoidal. . . . .	42
Figura 19 – Resposta a entrada senoidal. . . . .	42
Figura 20 – Entrada testes degrau unitário . . . . .	43
Figura 21 – Sistema criticamente estável: Resposta oscilatório para Kp de 480. . . . .	44
Figura 22 – Sistema operando sem controle. . . . .	46
Figura 23 – Sistema operando com controlador. . . . .	46
Figura 24 – Diagrama esquemático o amplificador. . . . .	51
Figura 25 – Amplificador em ponte H. . . . .	51
Figura 26 – Protótipo da equipe Fórmula CEM na 13 <sup>a</sup> edição da competição Formula SAE Brasil. . . . .	52
Figura 27 – Módulo CAN TJA 1050. . . . .	52
Figura 28 – Diagrama esquemático da ligação elétrica de componentes da injeção eletrônica do veículo Gol 5 <sup>a</sup> geração. . . . .	53

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tabela de constantes de tempo para Ziegler e Nichols. . . . .	23
Tabela 2 – Tabela de requisitos de documentação. . . . .	29
Tabela 3 – Tabela de requisitos de hardware. . . . .	30
Tabela 4 – Tabela de requisitos de software. . . . .	31
Tabela 5 – Tabela de requisitos de desempenho. . . . .	31
Tabela 6 – Comparação de microcontroladores . . . . .	32
Tabela 7 – Custo de componentes. . . . .	34

## LISTA DE SIGLAS

ABS	Sistema anti-travamento do Freio
BCM	Módulo de Controle da Carroceria
CAN	Rede de Controle de Área
CC	Corrente Contínua
CI	Circuito Integrado
ECM	Módulo de Controle do Motor
ECU	Unidade Eletrônica de Controle
ETC	Controle Eletrônico do Acelerador
FSAE	Competição estudantil de Formula SAE
Hz	Hertz
IDE	Ambiente de Desenvolvimento Integrado
MCI	Motor de Combustão Interna
PMI	Ponto Morto Inferior
PMS	Ponto Morto Superior
RPM	Rotação Por Minuto
SAE	Sociedade dos Engenheiros da Mobilidade
TBI	Corpo do Acelerador
TPS	Sensor de Posição da Válvula do Acelerador
V	volts



## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>9</b>
<b>1.1</b>	<b>Objetivo Geral</b>	<b>11</b>
<b>1.2</b>	<b>Objetivos Específicos</b>	<b>11</b>
<b>1.3</b>	<b>Organização</b>	<b>11</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO TEÓRICA</b>	<b>12</b>
<b>2.1</b>	<b>Motor de Combustão Interna</b>	<b>12</b>
2.1.1	Admissão de Ar	13
<b>2.2</b>	<b>Sistemas de Controle</b>	<b>15</b>
2.2.1	Requisitos de Desempenho e Erro em Regime Permanente	19
2.2.2	A Ação de Controle	22
<b>2.3</b>	<b>Sistema de Comunicação CAN</b>	<b>23</b>
2.3.1	Rede CAN em automóveis	25
<b>2.4</b>	<b>Requisitos e Modelagem do Produto</b>	<b>26</b>
<b>3</b>	<b>MÉTODO</b>	<b>27</b>
<b>4</b>	<b>DESENVOLVIMENTO</b>	<b>29</b>
<b>4.1</b>	<b>Especificação dos Requisitos do Sistema</b>	<b>29</b>
<b>4.2</b>	<b>Seleção dos Componentes de Hardware</b>	<b>32</b>
<b>4.3</b>	<b>Projeto do Hardware e do Software</b>	<b>34</b>
<b>4.4</b>	<b>Desenvolvimento da Bancada Piloto</b>	<b>37</b>
<b>4.5</b>	<b>Projeto do Controlador</b>	<b>40</b>
<b>5</b>	<b>RESULTADOS</b>	<b>45</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES</b>	<b>48</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>49</b>
	<b>APÊNDICE A</b>	<b>51</b>
	<b>ANEXO A.</b>	<b>52</b>
	<b>ANEXO B</b>	<b>53</b>
	<b>ANEXO C</b>	<b>54</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A demanda da indústria automotiva para atender legislações de veículos mais eficientes e seguros é renovada em períodos cada vez mais curtos. Com isso, cria-se um ambiente propício para estudos, pesquisas e desenvolvimento de novas soluções que possam atender esta demanda.

Discussões a respeito da automação e controle em veículos são antigas. Sharon (1983) aponta o *fly-by-wire*, técnica onde o acionamento dos atuadores de uma aeronave não são feitos diretamente pelo piloto, mas passam pelo processamento de um computador, e sugere a viabilidade do *drive-by-wire*. O autor propõem soluções para os sistemas veiculares e interface do condutor, como utilização de um joystick. Também apresenta uma comparação com a evolução dos computadores, seu custo, evolução e abrangência. Em sua conclusão faz uma crítica ao conservadorismo da indústria automotiva e sua priorização pelo lucro.

Em uma realidade promissora de veículos autônomos surgem questionamentos a cerca dos impactos na indústria e nos profissionais do setor automotivo. Toda via, inicialmente, as especificações de um veículo autônomo não diferem muito de um veículo moderno, apesar de existirem requisitos relevantes. Por exemplo, o *drive-by-wire* torna-se item obrigatório para o controle autônomo, um sistema de trem de força elétrico é preferível pela redução de sensores no gerenciamento do motor. E o item principal, os sistemas de software que controlam o carro inteiro (PETRONI, 2014).

Em um automóvel de passeio produzido nos dias de hoje há uma grande quantidade de unidades de controle eletrônico (ECU) para gerenciar cada um dos sistemas embarcados. Como o sistema anti-travamento do freio (ABS), módulo de controle do motor (ECM), módulo de controle da carroceria (BCM) e controle eletrônico do acelerador (ETC). A razão de existir uma ECU para cada um desses sistemas, se justifica pela confiabilidade requerida onde a falha de um não impede o outro sistema de funcionar. Nesse contexto, há também o compartilhamento de informações entre as unidades, que reduz significativamente a quantidade de fios incorporadas ao cabeamento elétrico do carro. Para que a comunicação entre as unidades seja possível, elas devem utilizar o mesmo canal (meio físico) e a mesma linguagem (protocolo de comunicação) (GUIMARAES, 2011).

A elevada quantidade de ECUs em um veículo atual leva a uma intensa troca de dados para que seja possível realizar suas funções. E a forma usual de enviar informações, utilizando uma linha dedicada, atingiu seu limite de viabilidade. Dois

fatores são evidentes, o primeiro, a complexidade em lidar com o cabeamento elétrico, o segundo, a limitação de pinos para conexão em um ECU. Deste modo, a solução encontra-se na utilização de barramentos seriais de dados, próprios para uso veicular, entre os quais a rede de controle de área CAN, do inglês *Controller Area Network* tornou-se padrão (BOSCH, 2005).

Garantir o correto funcionamento dos sistemas mecânicos que compõem um veículo é essencial para que seu desempenho e segurança sejam mantidos. A possibilidade de ler falhas que ocorreram durante a operação, avisar o período de execução da manutenção e alertar condições críticas de trabalho (baixo nível de óleo, baixa pressão de pneus, baixa tensão da bateria, entre outras) são alguns recursos que exploram a conectividade dos sistemas embarcados.

Em 2009, a montadora Toyota fez recall para 8 milhões de veículos, inclusive no Brasil, devido a falhas associadas ao acelerador eletrônico. Em 2014, ela foi condenada a pagar 1,2 bilhão de dólares para encerrar o inquérito relativo a essa investigação. Admitiu ter enganado os consumidores fazendo declarações enganosas sobre dois problemas que causavam aceleração involuntária (G1, 2014).

O gerenciamento eletrônico do motor consiste na leitura de várias grandezas para determinar a quantidade de combustível a ser injetada e o instante em que a centelha será disparada de modo a obter a melhor condição de operação. O fato desta máquina térmica trabalhar sob condições dinâmicas inferem sobre ela parâmetros de operação diferentes para cada uma dessas condições. Um destes parâmetros é a quantidade de ar admitida, ela é fundamental para que a mistura seja estequiométrica (razão de comburente e combustível igual a um) e ela varia conforme a condição de carga do motor (abertura do acelerador, variação angular da válvula do acelerador no coletor de admissão) que depende da solicitação do condutor (CAPELLI, 2010).

Este trabalho tem foco no desenvolvimento do sistema de controle eletrônico do acelerador. De modo a orientar sua concepção, o regulamento da competição estudantil de veículos fórmula, promovido pela sociedade dos engenheiros da mobilidade SAE, define parte dos requisitos. A Figura 26 no anexo A exemplifica um veículo formula SAE.

A concepção do sistema inicia pelo projeto e modelagem do software e do hardware, consolidando-se com sua implementação, teste em bancada e análise de desempenho do controlador.

Como resultados apresenta-se uma comparação entre sistemas sem e com controlador. Ainda apresenta-se quais requisitos foram atendidos dentre os apresentados inicialmente.

## **1.1 Objetivo Geral**

Desenvolver um sistema eletrônico para controle do acelerador de motores à combustão interna.

## **1.2 Objetivos Específicos**

Os objetivos específicos são:

- Estudo da planta do sistema;
- Projetar e descrever o hardware e software;
- Implantar o hardware e software em bancada;
- Testar e avaliar o desempenho do sistema desenvolvido;

## **1.3 Organização**

Para isto o trabalho apresentada uma revisão bibliográfica de motores a combustão interna, sistemas de controle, rede CAN automotiva e definição de requisitos de projeto que sustentarão o desenvolvimento e orientarão a incorporação de rotinas de funcionamento do sistema em situações críticas de falha. A metodologia esclarece como cada etapa do desenvolvimento é elaborada. Os resultados mostram o que foi desenvolvido, os requisitos que foram atendidos e o funcionamento do sistema. Na conclusão são feitos apontamentos sobre os resultados alcançados e apontamento para melhorias e trabalhos futuros.

## 2 REVISÃO TEÓRICA

Neste capítulo são apresentados fundamentos e conceitos aplicados ao desenvolvimento do projeto. Iniciando pelo conceitos de motores de combustão interna (MCI), métodos e requisitos gerais de um sistema de controle, sistema de comunicação CAN e uma breve revisão dos requisitos de projeto.

### 2.1 Motor de Combustão Interna

Conforme Çengel e Boles (2006) uma máquina térmica é definida como um dispositivo que converte calor em trabalho. Nelas podem ser observadas as seguintes características: recebem calor de uma fonte à alta temperatura; convertem parte desse calor em trabalho; rejeitam o restante do calor para um sumidouro a baixa temperatura; operam em um ciclo. Usualmente, o termo *máquina térmica* é utilizado com sentido mais amplo, incluindo dispositivos como motores a combustão interna MCI e turbinas à gás que não realizam um ciclo termodinâmico (ciclo em que o fluido de trabalho é aquecido e resfriado à condição inicial), mas realizam um ciclo mecânico.

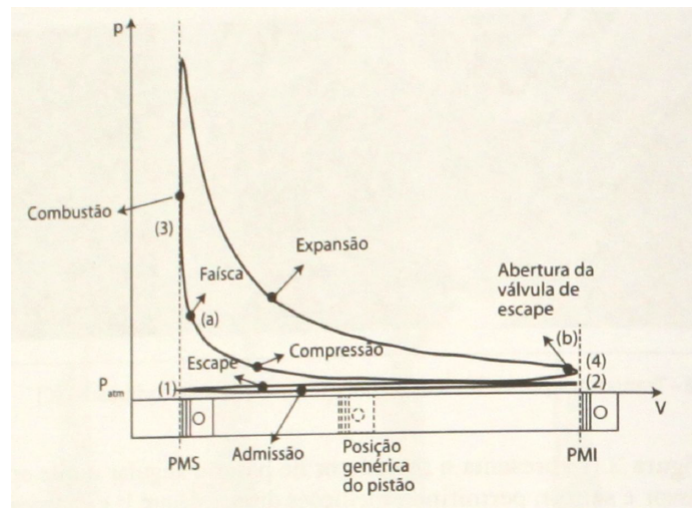
De acordo com Heywood (1988), o propósito dos MCI é a geração de potência mecânica a partir da energia química contida no combustível. Nos motores à combustão interna, diferentemente dos motores de combustão externa, a liberação de energia acontece dentro do motor. A mistura ar-combustível antes da queima e os produtos da combustão são os fluidos de trabalho. A transferência de trabalho que fornecem a potência desejada ocorre entre esses dois fluidos de trabalho e os componentes mecânicos do motor.

O processo de conversão periódica realizado pelo MCI é denominado ciclo de operação e é dividido em 4 períodos, ou tempos, sendo eles: admissão, compressão, expansão e escape. A forma como esses períodos ocorrem nos permite uma classificação quanto ao número de tempos, que pode ser 2 ou 4 tempos, de acordo com o número de movimentos realizados pelo pistão para completar um ciclo. Em um motor de 4 tempos os, 4 tempos são realizadas 4 movimento do pistão e um ciclo é realizado em 720 graus de rotação do virabrequim. Enquanto no motor de 2 tempos os processos se sobrepõem, a admissão e compressão se tornam um tempo, e expansão e escape outro. Sendo realizados em 2 movimentos do pistão e completando um ciclo em 360 graus do virabrequim (BRUNETTI, 2012, p.36).

Brunetti (2012, p.34) ainda classifica os MCI quanto a ignição em dois tipos

fundamentais a por faísca ou Otto e a espontânea ou Diesel. A principal diferença entre eles está na forma como ocorre a combustão do fluido de trabalho que só é possível devido as diferenças do combustível utilizado. No ciclo Otto é necessária uma centelha elétrica e iniciar a queima da mistura. A Figura 1 mostra a relação ente pressão e volume dentro do cilindro do motor.

Figura 1 – Diagrama P-V do ciclo Otto.



Fonte: (BRUNETTI, 2012)

### 2.1.1 Admissão de Ar

O ciclo de maior relevância para este trabalho é o ciclo de admissão.

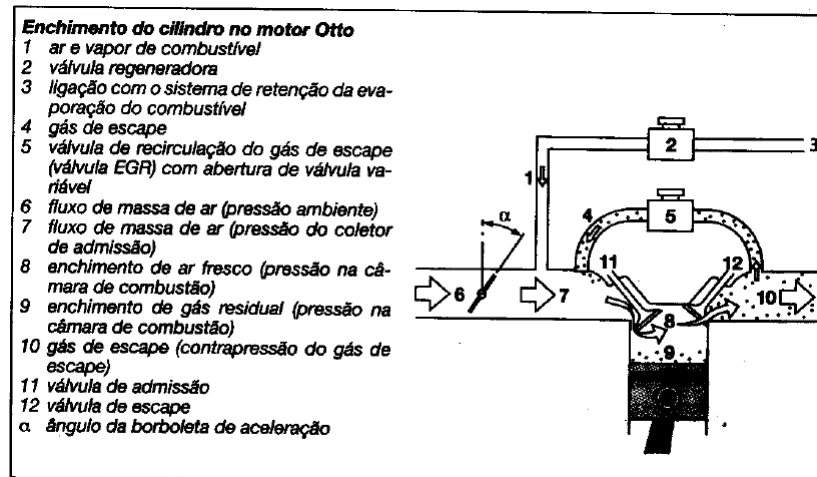
O sistema de admissão em um motor à combustão interna ciclo Otto, geralmente consiste em um filtro de ar, uma válvula de aceleração, injetores de combustível e coletor de admissão. Durante o tempo de admissão, ocorrem perdas de pressão no fluxo de ar fresco ao passar por cada um desses componentes e também há perdas adicionais na passagem pela válvula de admissão. Assim, a queda de pressão ao longo do sistema de admissão depende da velocidade do motor, da resistência ao escoamento imposta por cada elemento, a seção transversal por onde o ar fresco se move e a densidade do ar (HEYWOOD, 1988).

Admissão: o pistão desloca-se do ponto morto superior PMS ao ponto morto inferior PMI com a válvula de admissão aberta, de tal forma que o cilindro esta em contato com o ar ambiente. A pressão em seu interior mantém-se um pouco inferior que a pressão atmosférica, dependendo da perda de carga no sistema de admissão, causada pelo escoamento da mistura combustível-ar (ou apenas ar no caso de injeção direta de combustível) succionada pelo movimento do pistão. (BRUNETTI, 2012, p. 86)

A Figura 2 mostra o fluxo de ar por meio de setas, juntamente com alguns elementos do sistema de admissão. Nela verifica-se o ar fluindo pela válvula do

acelerador (6), pela válvula regeneradora (2) dos gases do sistema de regeneração (vapor de combustível oriundo da evaporação no reservatório), pela válvula de recirculação (5) dos gases do escape que passam pela válvula de admissão (11) conforme o pistão se deslocando para o PMI.

Figura 2 – Fluxo de de ar no ciclo de admissão.

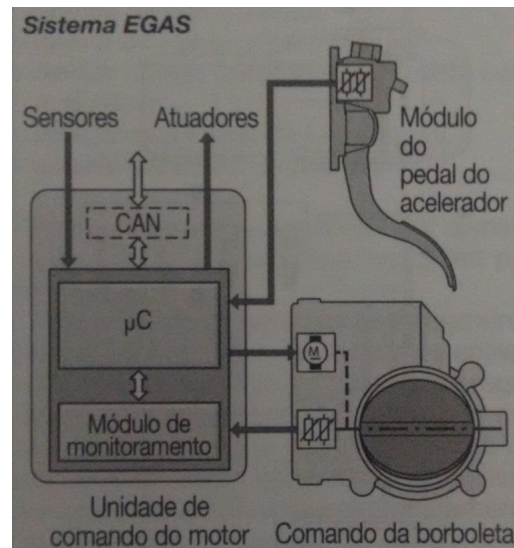


Fonte: (BOSCH, 2005, p.593)

O elemento de central influência no controle da vazão de ar para o motor é a válvula de aceleração, também chamada de válvula borboleta. Quando ela não está totalmente aberta o fluxo de ar é restringido e devido a limitação da quantidade de ar o torque entregue pelo motor é menor. O efeito de estrangulamento realizado depende de fatores como o percentual de abertura da válvula, o diâmetro da válvula e da rotação do motor. O acionamento da válvula do acelerador pode se dar de forma direta pela ligação mecânica do pedal do acelerador, ou eletronicamente como apresentado na Figura 3 (BOSCH, 2005, p.594).

O sistema do ETC proposto pela empresa BOSCH, denominado sistema EGAS, é composto pelo módulo do pedal do acelerador, unidade de comando do motor e unidade de comando do corpo da TBI. Essa é composta pela válvula do acelerador, pelo controle elétrico da válvula e pelo sensor de posição da válvula do acelerador (TPS). A válvula do acelerador é atuada por um motor de corrente contínua (CC) que está ligado ao eixo da válvula por um conjunto de redução de engrenagens. O sensor de posição da válvula é redundante e tem a função de enviar a posição atual da borboleta para o módulo. A intenção do condutor é transmitida por sensores redundantes no pedal do acelerador ao módulo do pedal. A unidade da TBI calcula a abertura necessária com base na posição atual informada pelo TPS, a informação do TPS é enviada para unidade do motor (BOSCH, 2005, p.595).

Figura 3 – Representação da comunicação do sistema com ETC.



Fonte: Bosch (2005, p.595)

## 2.2 Sistemas de Controle

Para Nise (2013, p.2), um sistema de controle consiste em subsistemas e processos (ou plantas) construídos com objetivo de se obter uma resposta de saída com desempenho desejado para uma entrada específica.

Ogata (2010) apresenta as definições para componentes do sistema de controle com sendo: a variável controlada, grandeza ou a condição que é medida e controlada, normalmente a saída do sistema; sinal de controle, grandeza ou condição que modifique a variável controlada; planta, pode ser parte de um equipamento com objetivo de realizar determinada operação ou qualquer objeto físico a ser controlado; processo, toda operação a ser controlada; sistema, a combinação de componentes que agem em conjunto para atingir determinado objetivo; distúrbio, um sinal que tende a afetar de maneira adversa o valor da variável de saída de um sistema; Controle com realimentação, uma operação que na presença de distúrbios, tende a reduzir as diferenças entre a saída e um valor de referência.

Podemos, deste modo, compreender o sistema de controle como um recurso que possibilita, a um processo com variáveis bem definidas ou não, ajustar os parâmetros de funcionamento para que ele opere de acordo com o desempenho estabelecido para sua função.

Para elaborar o projeto de um sistema de controle Nise (2013) apresenta 6 passos que estão descritos abaixo:

1. Transformar requisitos em um sistema físico: a partir dos requisitos e características do sistema, como por exemplo deslocar uma massa determinada em um intervalo de tempo para uma posição específica, definir as etapas e



- componentes físicos que realizarão essa função;
2. Desenhar um diagrama de blocos funcional: consiste em blocos com a descrição qualitativa das etapas do processo ordenados conforme a sequência cronológica;
  3. Criar um esquema: transformação dos blocos funcionais em diagrama esquemático que representam com as simplificações cabíveis os componentes elétricos, mecânicos e eletromecânicos em sua operação;
  4. Desenvolver um modelo matemático: aplicação das leis da física que regem o funcionamento de cada componente no diagrama esquemático, usualmente obtém-se uma equação diferencial;
  5. Reduzir o diagrama de blocos: a partir das equações obtidas para cada subsistema do esquema deve-se uni-las de modo a obter uma equação resultante que representa a relação entre as variáveis de entrada e saída;
  6. Analisar e projetar: consiste em realizar testes no sistema para verificar se o funcionamento atende aos requisitos estabelecidos. Caso não atenda é necessário adicionar ou alterar subsistemas para que o desempenho esteja de acordo com o desejado.

Modelar a matemática do processo é uma etapa com impacto direto no projeto do sistema de controle. Definir a variável de controle, o sinal de controle, a planta e o processo dão início a esta fase. Segue-se aplicando as leis da física que regem os fenômenos envolvidos, verifica-se a aplicação de simplificações, então obtém-se uma equação diferencial. A representação adotada para o desenvolvimento deste trabalho se dará pela função de transferência e por diagrama de blocos, de modo a orientar a análise desenvolvimento do projeto. Ogata (2010) menciona que construir modelos matemáticos adequados é a parte mais importante da análise do sistema de controle como um todo.

A função de transferência é obtida a partir da aplicação da transformada de Laplace, Equação 2.1, à equação diferencial invariante no tempo e é definida como a relação a saída e a entrada, admitindo que as condições iniciais sejam nulas.

$$L[f(t)] = F(s) = \int_{0-}^{\infty} f(t)e^{st} dt \quad (2.1)$$

onde  $s = \sigma + j\omega$

A partir da Equação 2.1, que relaciona  $f(t)$  com  $F(s)$ , pode-se estudar e analisar o sistema de interesse no domínio complexo que simplifica operações algébricas entre blocos. Após o uso da transformada inversa de Laplace, Equação 2.2, permite retornar para o domínio do tempo (NISE, 2013).

$$L^{-1}[F(s)] = \frac{1}{2\pi j} \int_{\sigma-j\infty}^{\sigma+j\infty} F(s)e^{st} ds = f(t)u(t) \quad (2.2)$$

Algumas equações diferenciais relevantes para este trabalho são apresentadas abaixo. Elas podem ser obtidas do equacionamento de leis físicas sobre o sistema. Aqui serão apresentadas de acordo com Nise (2013) e Ogata (2010).

O torque desenvolvido por um motor CC  $T_m$  é proporcional a corrente de armadura  $i_a$ , onde  $K_v$  é a constante de torque.

$$T_m = K_v \cdot i_a(t) \quad (2.3)$$

A tensão de armadura em um servo motor é descrita pela equação Equação 2.4 apresentada abaixo,

$$u_a(t) = L_a \cdot \frac{di_a}{dt} + R_a \cdot i_a(t) + u_b \quad (2.4)$$

Onde a  $L_a$  é a indutância na armadura,  $R_a$  é a resistência na armadura e  $u_b$  é a força contra eletromotriz. De acordo com Nise (2013), a força contra eletromotriz é um efeito gerado por um condutor movendo-se ortogonalmente a um campo magnético o que gera um diferença de potencial elétrico nos terminais do condutor. Essa força é proporcional a velocidade  $\frac{d\varphi}{dt}$  é descrita pela Equação 2.5.

$$u_b = K_{fem} \frac{d\varphi}{dt} \quad (2.5)$$

O torque de um corpo em movimento de rotação se dá pelo momento de inércia  $J$  e aceleração angular  $\frac{d^2\varphi}{dt^2}$  Equação 2.6.

$$T_J = J \frac{d^2\varphi}{dt^2} \quad (2.6)$$

O torque produzido por uma mola de rotação é varia conforme a constante elástica  $K_s$  e o deslocamento angular  $\varphi$ , como na Equação 2.7.

$$T_s = K_s \varphi \quad (2.7)$$

No movimento de rotação de eixos sobre mancais existe amortecimento viscoso. Na TBI esse efeito está presente no deslizamento do eixo da válvula e do eixo do motor. O amortecimento viscoso  $M_b$  pode ser descrito  $b$  coeficiente de amortecimento viscoso e pela velocidade angular  $\frac{d\varphi}{dt}$  por:

$$M_b = b \frac{d\varphi}{dt} \quad (2.8)$$

Em sistemas de transmissão com engrenagens há deformação e aquecimento devido ao atrito seco  $M_c$  na transmissão de força de reação normal  $N$  entre os dentes das engrenagens. Independentemente do sentido de rotação o atrito seco irá dissipar parte da energia do sistema, efeito representado pela função  $sgn(\varphi)$ . O coeficiente de

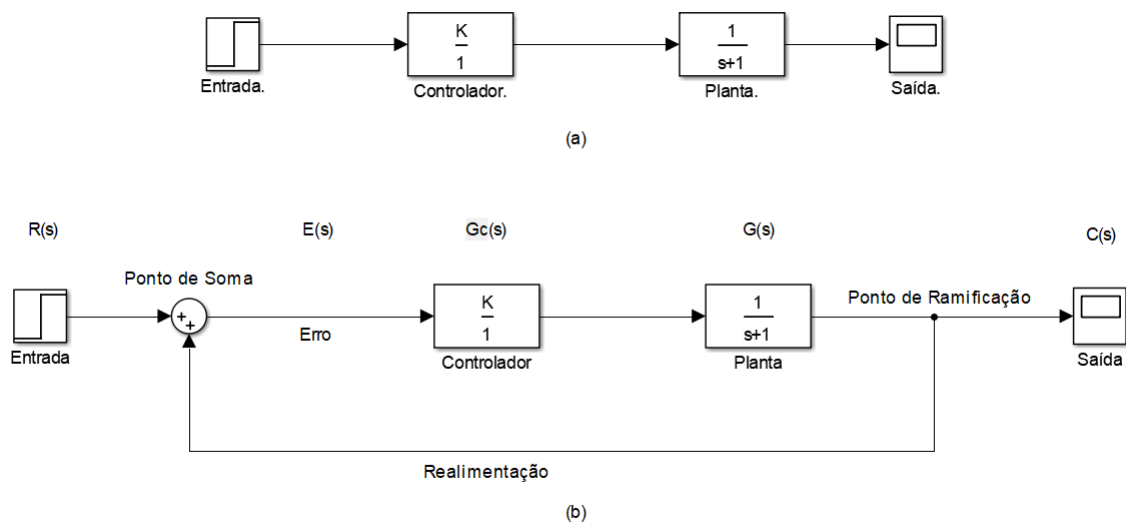
atrito é  $\mu$  depende dos materiais que estão em contato e se há movimento relativo entre as peças. A Equação 2.9 mostra entre as variáveis.

$$M_c = \text{sgn}(\varphi)\mu N \quad (2.9)$$

Uma forma usual de representar um sistema de controle é por meio do diagrama de blocos. Ele é uma representação gráfica das funções desempenhadas por cada elemento do sistema de controle. E diferem-se da representação matemática por permitir uma visualização da sequência do sistema (OGATA, 2010).

A Figura 4 apresenta dois diagrama de blocos gerados pelo autor no software SIMULINK.

Figura 4 – Diagrama de blocos.



Fonte: Autor(2017)

Os elementos que compõem o diagrama são a seta, que indica o fluxo do processo, os blocos, que descrevem uma operação/função de transferência, os pontos de junção, onde se somam ou subtraem-se as sinais que nele chegam e os pontos de ramificação, que compartilham a saída de uma etapa. Na Figura 4, dois sistemas de controle são apresentados. Nele verificamos a entrada  $R(s)$ , um ponto de soma, a função de transferência, um ponto de ramificação, uma seta de realimentação e a saída  $C(s)$  (NISE, 2013, p.15).

A partir da Figura 4, podemos compreender mais alguns elementos essenciais ao problema de controle e a relação com as duas configurações típicas dos sistemas de controle, a malha aberta Figura 4 (a) e a malha fechada Figura 4 (b).

A configuração de malha fechada, caracteriza-se pela realimentação que permite comparar o valor da saída com o valor da entrada e assim calcular erros,  $E(s)$ , que serão compensados pelo controlador. A realimentação, em sistemas automatizados,

é feita por sensores instalados na saída da planta ou em outro ponto que deseja-se verificar. Esse recurso dá a configuração de malha fechada a característica de ajustar o sinal de referência quando um ruído estiver presente levando o valor de saída para fora dos padrões (NISE, 2013, p.7).

O sistema em malha aberta não possui realimentação por isso não é possível verificar o processo e fazer ajustes no sinal de entrada. Entretanto, nem todo sistema necessita ser realimentado, cabendo verificar a viabilidade de fechar sua malha de controle (NISE, 2013, p.6).

Outro aspecto importante para este trabalho é a não linearidade que alguns sistemas podem apresentar. Nise (2013) e Ogata (2010) apresentam um sistema linear como sendo um sistema onde a propriedade da superposição se aplica. Este princípio diz que a resposta de um sistema para entradas simultâneas pode ser determinado pela soma da resposta individual de cada entrada.

De acordo com Nise (2013), alguns fatores que inserem não linearidades ao sistema é a imprecisão no acoplamento de engrenagens que geram histerese e o atrito de deslizamento em eixo de motores elétricos que geram uma não linearidade denominada zona morta.

### 2.2.1 Requisitos de Desempenho e Erro em Regime Permanente

Para verificar se um determinado sistema está operando de acordo com o comportamento esperado, avaliam-se alguns parâmetros denominados requisitos de desempenho. Eles apontam características da resposta transitória, ou também chamada resposta natural. A técnica de polos e zeros, que permite obter de forma rápida informações sobre a resposta natural (NISE, 2013).

De acordo com Ogata (2010), frequentemente, as características de desempenho de um sistema são estabelecidas em função da resposta transitória para um sinal de entrada tipo degrau, por se tratar de uma entrada brusca que leva o sistema do repouso ao seu máximo subitamente.

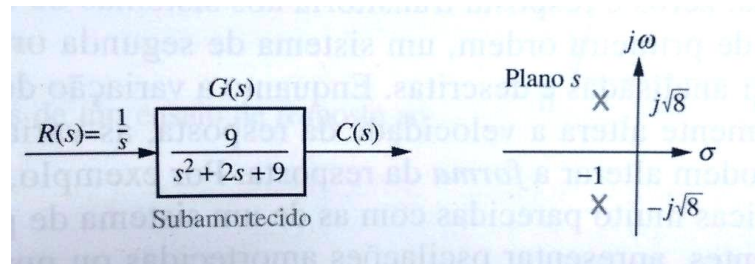
Um sistema de ordem dois, cujo o expoente de maior ordem da variável  $s$  no denominador é igual a dois, é apresentado na Figura 5. A disposição dos polos no plano complexo para um sistema de segunda ordem a direita e seu diagrama de blocos a esquerda. Na Equação 2.10 o modelo geral da função de transferência para um sistema de segunda ordem é apresentado, onde  $\omega_n$  é a frequência natural do sistema em  $\frac{rad}{s}$  e  $\xi$  é o fator de amortecimento.

$$\frac{C(s)}{R(s)} = G(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (2.10)$$

Na Figura 5 pode-se verificar a função de transferência no interior do bloco. Dela podemos extrair a resposta temporal do sistema Equação 2.12, aplicando a inversa

de Laplace a Equação 2.11. No plano complexo, o eixo das ordenadas tem valores reais  $\sigma$  e o eixo das abscissas valores complexos  $j\omega$  oriundos da variável  $s$ . Os polos da função de transferência são complexos e conjugados  $s_{1,2} = -1 \pm j\sqrt{8}$  é obtido determinando a raiz do denominador.

Figura 5 – Sistema de segunda ordem



Fonte: Nise (2013)

Os polos da função de transferência são os valores da variável  $s$  que fazem a função de transferência ir para o infinito. Ou seja, são quaisquer raízes do denominador da função de transferência comuns às raízes do numerador. Os zeros da função de transferência são os valores da variável  $s$  que fazem com que a função se torne zero, são quaisquer raízes do numerador comuns ao denominador (NISE, 2013, p.133).

Isolando a saída  $C(s)$ , considerando a entrada  $R(s)$  uma entrada em degrau e fazendo a uma expansão em frações parciais chegamos a:

$$C(s) = \frac{1}{s} \cdot \frac{9}{s^2 + 2s + 9} \quad (2.11)$$

Aplicando a transformada inversa de Laplace à Equação 2.11 temos a resposta no domínio do tempo na Equação 2.12.

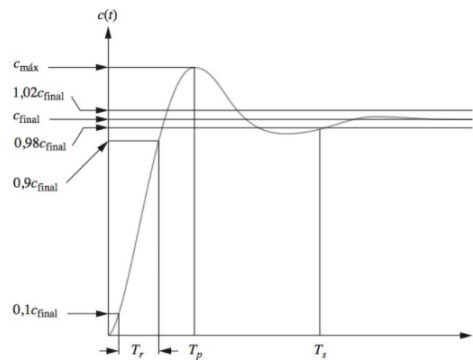
$$C(s) = 1 - 1,06e^{-t} \cos(\sqrt{8}t - 19,47^\circ) \quad (2.12)$$

Para o exemplo apresentado acima a parcela natural da resposta  $C(s)$  será do tipo exponencial como apresentado na Figura 6.

Na Figura 6 algumas características da resposta como constante de tempo  $\frac{1}{a}$ , tempo de subida  $T_r$ , máximo percentual de sobre sinal  $M_{p,ss}$ , tempo de acomodação  $T_s$  são indicadas. Nise (2013) e Ogata (2010) apresentam as definições para resposta de um sistema de ordem dois que são apresentados na sequência. Entretanto, as equações, Equação 2.13, Equação 2.14 e Equação 2.15, são apresentadas de acordo com as publicadas por Nise (2013).

A tempo de subida permite inferir sobre a velocidade da resposta transitória, quanto menor for o valor de  $a$  mais rápida será a resposta transitória. O valor de uma constante de tempo é o tempo necessário para que a resposta atinja 63% da resposta

Figura 6 – Resposta de um sistema de segunda ordem.



Fonte: (NISE, 2013)

final.

$$T_r = \frac{\pi - \phi}{\omega_n \sqrt{1 - \xi^2}} \quad (2.13)$$

O percentual máximo de sobre sinal  $\%M_{pss}$  é definido no ponto em que a resposta atinge seu valor máximo. A equação que nos permite calcular o tempo de subida é

$$\%M_{pss} = e^{-\pi\xi / (\sqrt{1 - \xi^2})} \cdot 100 \quad (2.14)$$

O tempo de acomodação é definido como o tempo para que a resposta alcance 98% da resposta final. A Equação 2.15 retorna o tempo de acomodação.

$$T_s = \frac{4}{\xi\omega_n} \quad (2.15)$$

O erro em regime permanente é a diferença entre saída e entrada, para uma entrada de teste aplicada quando o tempo tende ao infinito. As entradas testes podem ser uma entrada degrau, um valor constante aplicado à entrada, uma entrada em rampa, onde o valor da entrada cresce linearmente, ou uma entrada parabólica, onde a entrada possui aceleração constante (NISE, 2013, p.274)

Para Ogata (2010) os erros em regime permanente podem ser oriundos de diferentes fatores, devido a imperfeições do sistema (desgaste, falha de componente, entre outros) e devido a incapacidade do sistema para certas entradas. Essa incapacidade é intrínseca ao tipo do sistema (número de polos posicionados sobre a origem do plano complexo). No sistema tipo um o erro em estacionário é nulo para entrada degrau, mas é constante para mesma entrada em rampa.

Segundo Nise (2013) e Ogata (2010) o erro em regime permanente de um sistema de controle com realimentação, pode ser obtido aplicando o teorema do

valor final na função de transferência do erro, conforme a Equação 2.16. A função de transferência irá depender da planta e do processo, mas tem o formato da Equação 2.17.

$$e_{ss} = \lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = \lim_{s \rightarrow 0} s \cdot E(s) \quad (2.16)$$

$$E(s) = \frac{R(s)}{1 + G(s)} \quad (2.17)$$

### 2.2.2 A Ação de Controle

Um controlador, ou compensador, permite que o processo desempenhado por uma planta opere com erro zero ou com um valor muito pequeno. Eles podem atuar tanto na resposta natural, regime permanente ou em ambos, dependendo do tipo de controlador adotado. A ação do controlador (efeito do controlador sobre a planta) sucede sob o valor do erro, onde um sensor (elemento de medição) verifica a variável de interesse na saída do subsistema e envia um valor para comparação com o valor de referência, essa comparação gera o valor do erro (NISE, 2013; OGATA, 2010).

Para certas características de um processo estaremos interessados em tratar erros em diferentes situações. De acordo com Ogata (2010) e Nise (2013), para erros no tempo presente uma ação proporcional, ou ganho puro, implicará em um erro em regime permanente. Esta condição pode ser solucionada pela ação sobre a integral do erro, a qual considera os erros no tempo passado para levar o erro de regime permanente à zero. Outro ponto de interesse é a resposta natural do sistema, nessa situação busca-se melhorar a resposta do sistema nas transições entre estados o que é pode ser obtido analisando a tendência do erro por meio de sua derivada (está ação não pode ser implementada sozinha).

A relação matemática das ações de controle são apresentadas abaixo nas equações no domínio do tempo conforme OGATA (p.21, 2010).

Ação proporcional dada pela Equação 2.18 temos o produto do ganho proporcional  $K_p$  pelo erro no presente instante de tempo  $e(t)$ .

$$u(t) = K_p e(t) \quad (2.18)$$

Ação proporcional integral é descrita pela Equação 2.19. Verifica-se a ação proporcional mais a ação integral. A ação integral consiste no produto do ganho proporcional  $K_i = \frac{K_p}{T_i}$  pela integral do erro.

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt \quad (2.19)$$

Tabela 1 – Tabela de constantes de tempo para Ziegler e Nichols.

Controlador	Kp	Ti	Td
P	$0,5K_{cr}$	$\infty$	0
PI	$0,45K_{cr}$	$\frac{1}{1,2}P_{cr}$	0
PID	$0,6\frac{T}{L}$	$0,5P_{cr}$	$0,125P_{cr}$

Ação proporcional derivativa é descrita pela Equação 2.20

$$u(t) = K_p e(t) + K_p T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2.20)$$

Quando combinamos as ações de controle apresentadas obtemos um controlador proporcional, integral e derivativo (PID) que resulta em uma melhora nas respostas transitória e permanente (OGATA, 2010).

As Equação 2.21 e Equação 2.22 são respectivamente a equação temporal e função de transferência do controlador PID.

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt + K_p T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2.21)$$

Cuja função de transferência é,

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (2.22)$$

Onde,  $K_p$  é o ganho proporcional,  $T_i$  é o tempo integrativo e  $T_d$  é o tempo derivativo. Estes valores são valores para ajuste do controlador.

Uma etapa essencial para que o sistema de controle opere dentro das condições desejadas é a etapa de sintonia ou ajuste. De acordo com Nise (2013) e Ogata (2010) um método experimental amplamente aplicado é o proposto por Ziegler e Nichols. Método no qual é necessário obter a resposta oscilatória do sistema para uma entrada degrau, pela aplicação de um ganho proporcional ao erro. Quando o sistema oscilar incessantemente define-se o ganho  $K_p$  aplicado como ganho crítico  $K_{cr}$ . E observando a resposta pode-se determinar o período de oscilação, o período crítico  $P_{cr}$ . Os valores de ganho e período crítico podem ser utilizados para um ajuste inicial do controlador, a partir da aplicação da Tabela 1.

### 2.3 Sistema de Comunicação CAN

De acordo com Bosch (2005), a rede de comunicação CAN é aplicada em sistemas de carroceria, propulsão e dinâmica do veículo. As unidades de controle desses sistemas compartilham informações pelo barramento de dados reduzindo as conexões e a probabilidade de falhas na rede.

O CAN foi desenvolvido pela empresa BOSCH como um sistema de transmissão de mensagens multi-mestre, que especifica a máxima taxa de transmissão



em 1 megabit por segundo (Mbps). Diferentemente de uma rede convencional como USB (Universal Serial Bus) ou Ethernet, a CAN não envia grandes pacotes de dados ponto-a-ponto do nó A para o nó B sob supervisão de um mestre central do barramento. Em uma rede CAN muitas mensagens curtas como temperatura ou rotação do motor RPM, são transmitidas para toda rede, o que permite consistência de dados em cada nó da rede (CORRIGAN, 2002; DENTON, 2004).

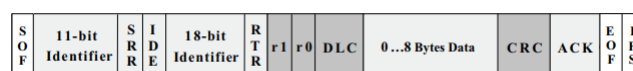
O endereçamento utilizado pelo CAN é baseado em mensagens. Para isso um identificador é atribuído para cada mensagem, de modo que cada módulo processa apenas as mensagens cujos identificadores constam na sua lista de identificadores (BOSCH, 2005).

A mensagem do CAN é estruturada em sete partes e possui um tamanho máximo de 130bits, o que torna o tempo de espera para próxima mensagem conhecido. Bosch (2005) nos apresenta os campos da mensagem:

- O início do registro, SOF (Start Of Frame), que indica o começo da mensagem e sincroniza os módulos.
- O campo de arbitragem, *identifier* que contém o identificador, que pode ter 11 ou 29 bits dependendo do formato adotado, e bits adicionais para controle que definem se a mensagem é classificada como registro de dados ou registro remoto.
- O campo de controle, DLC (Data Length Code), contém a quantidade de bits de dados contidos no campo de dados.
- O campo de dados, contém a informação da mensagem, são disponibilizados 8 bytes.
- O campo CRC (Cyclic Redudancy Check) contém uma palavra para verificação da transmissão.
- O campo ACK, contém o campo de confirmação de todos os nós receptores, indicando que a mensagem foi recebida sem erros.
- O fim do registro, EOF (End Of Frame), marca o final da mensagem.

Na Figura 7 a estrutura da mensagem é apresentada.

Figura 7 – Estrutura da mensagem CAN



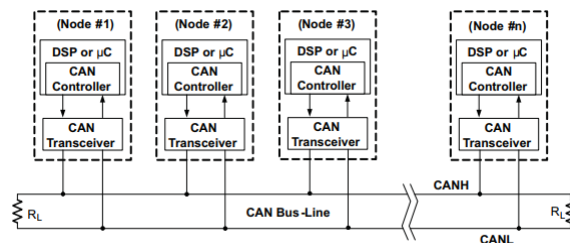
Fonte: (CORRIGAN, 2002)

No protocolo CAN os estados lógicos são definidos em recessivo, nível alto, e dominante, nível baixo. Quando um bit dominante é enviado para rede os bits recessivos enviados simultaneamente são sobre escritos. Essa característica permite a arbitragem bit-a-bit do identificador das mensagens. Neste sistema de arbitragem o identificador com o menor valor binário tem prioridade, ou seja, caso múltiplos nós

estejam transmitindo simultaneamente aquele com menor valor irá "vencer" e continuar a transmissão e os demais módulos mudam para o modo receptor e tentam retransmitir ao final da mensagem (BOSCH, 2005; CORRIGAN, 2002).

O barramento CAN é formado por um par de fios trançado em estrutura linear e o sinal de transmissão é diferencial e balanceado. Isto significa que os dados serais enviados pelos pinos CAN\_TX e CAN\_RX são modulados para linhas CANH e CANL, mostradas na Figura 8, as quais a mesma amplitude de corrente mas com sentidos opostos. Essa característica aumenta a rejeição em modo comum (quando um circuito integrado (CI) recebe sinais de mesma amplitude, frequência e fase em seus terminais o sinal é anulado na saída) e melhora a imunidade ao ruído. Permitindo ao CAN robustez a interferências (CORRIGAN, 2002).

Figura 8 – Barramento CAN



Fonte: (CORRIGAN, 2002)

### 2.3.1 Rede CAN em automóveis

De acordo com Denton (2004), o cabeamento elétrico de um veículo cresceu continuamente nos últimos 25 anos, chegando a um estágio onde seu tamanho e peso tornaram-se um problema considerável. Os sistemas no painel de instrumentos podem ultrapassar mais de 100 fios elétricos e conexões, na porta do motorista chegam a 50 fios. Portanto, para Bosch (2005) e Capelli (2010) soluções como o CAN, troca de informação via barramento serial de dados, possibilitam reduzir o cabeamento elétrico e aumentar a segurança do veículo.

Bosch (2005) e Corrigan (2002) indicam as seguintes normas para aplicação automotiva. Quanto a velocidade de comunicação as normas ISO (2006) 11898-3, para velocidades de transmissão de dados até 125kbit/s e para velocidades superiores a esta as normas ISO (2016) 11898-2. Quanto a tipo veículo para aplicação as normas SAE (2001) J 2284 para automóveis de passeio e SAE (2013) J 1939 para veículos comerciais (ônibus e caminhões).

## 2.4 Requisitos e Modelagem do Produto

Os requisitos são características desejadas para o produto. Uma condição ou capacidade que deve ser desempenhada por um sistema a fim de atender uma especificação do cliente ou legislação. Estes requisitos devem ser definidos, analisados e documentados com detalhes a fim de orientar o desenvolvimento e permitir sua revisão ao longo da execução do projeto (AURUM; WOHLIN, 2005; XAVIER, 2009).

Para Pahl et al. (2007), uma das principais dúvidas na definição da lista de requisitos está relacionada a quantidade e qualidade da documentação e informações de projeto. Em algumas situações há requisitos implícitos, o que exige uma etapa de interpretação das necessidades e do mercado do cliente. Portanto, compreender as reais necessidades do cliente, suas expectativas implícitas, especificar as restrições e estabelecer quais partes estão abertas para desenvolvimento se faz essencial para que o produto tenha sucesso.

De acordo com Larman (2007), na metodologia de projeto unificado, para desenvolvimento de softwares, lidar com requisitos fixados (em cascata) no início do projeto pode levar ao não atendimento desses requisitos. Nestes projetos a programação e testes iniciam quando cerca de 10% dos requisitos mais importantes e de maior risco foram especificados.

Os requisitos para um software podem ser classificados em diferentes tipos. Independentemente do tipo definido, durante a implementação não é fácil identificar tais diferenças. Uma das classificações define os requisitos em requisitos funcionais e requisitos não funcionais. Os requisitos funcionais são aqueles que compõem as ações do sistema. Os requisitos não-funcionais consistem nos que impõem restrições ao sistema (AURUM; WOHLIN, 2005).

Modelar um software consiste em projetar suas atividades antes de escrever o código. A modelagem do software não considera uma linguagem de programação específica, ela utiliza de diagramas para representar os elementos da aplicação e estabelecer a relação entre o problema e a solução. Deste modo, possibilita uma visão clara das funções desempenhadas e a forma como os requisitos serão atendidos pelo programa (LARMAN, 2007).

### 3 MÉTODO

A metodologia deste trabalho, que tem como objetivo geral o desenvolvimento do sistema eletrônico para controle do acelerador de um motor de combustão interna. Pretende-se também que esse trabalho dê subsídios a incorporação do sistema a um veículo de competição Formula SAE. Para isto, serão realizadas as seguintes etapas.

- **Especificação dos Requisitos do Sistema**

De modo a estabelecer características necessárias de software e de hardware, e também viabilizar a aplicação do sistema desenvolvido é necessário que sejam atendidos os requisitos regulamentares e de desempenho. A fim de nortear essa parte do desenvolvimento e buscar um resultado final que permita aplicação futura o regulamento da competição Fórmula SAE foi tomado como base. Além disso, requisitos de operação específicos para o comportamento de sistemas devem ser estabelecidos devido ao impacto no funcionamento do motor e na dinâmica do veículo. De modo a estarem em conformidade com as características esperadas pela equipe/piloto.

A apresentação dos requisitos será feita em forma de uma tabela discriminando os requisitos em funcionais, não funcionais, quanto sua origem de regulamento ou de desempenho e quanto sua aplicação em hardware, software e documentação.

- **Seleção dos Componentes de Hardware**

As características dos componentes que irão constituir o sistema são estabelecidas a partir do escopo do trabalho e da etapa de levantamento de requisitos. Então, a seleção dos componentes será baseada em aspectos como disponibilidade no mercado, custo e atendimento dos requisitos. Podendo estes itens limitar o atendimento de um ou mais requisitos.

- **Projeto do Software e do Hardware**

O projeto do software utilizará fluxogramas para esboçar a sequência de atividades desenvolvidas. Por ser um diagrama difundido e permitir o rápido entendimento do código por pessoas que não estão familiarizadas com códigos computacionais.

Para o desenvolvimento do código serão empregadas duas outras ferramentas disponibilizadas pelo fabricante das unidade de microcontrolador MCU. São eles o Halcogen, que habilita e configura os hardwares do microcontrolador. E o CCS que é o ambiente de desenvolvimento integrado (IDE) de programação, *debugger* e compilação dos códigos.

O hardware do sistema trata da interface entre a parte mecânica e o software. Ele é formado por componentes eletrônicos que irão facilitar a transformação de grandezas físicas em elétricas e vice versa. Seu projeto baseia-se nas características dos componentes selecionados e nas definições de operação do sistema.

- **Projeto do Controlador**

Para estabelecer condições de operação aos sistemas que dependem do funcionamento do acelerador eletrônico deve-se projetar um controlador, o qual funcionará integrado ao software. O projeto consiste em definir a função de transferência da planta a ser controlada, aplicar sinais testes no sistema físico em malha aberta, analisar e identificar o comportamento do sistema e aplicar a técnica de Ziegler e Nichols para iniciar a sintonia do controlador.

A partir desse estudo o refino do controlador será feito experimentalmente. Pela utilização da bancada de testes que será desenvolvida.

- **Desenvolvimento de uma Bancada Piloto**

No projeto de um sistema embarcado, é essencial que sejam realizados testes e ajustes de modo a garantir seu bom funcionamento individual antes de sua integração junto ao restante do veículo para uma nova fase de testes.

A bancada de testes consiste em montar os componentes que compõem o sistema em uma bancada instrumentada com osciloscópio e fonte de alimentação. Com ela permite-se o refinamento da operação do sistema e verificação dos parâmetros configurados em cada ajuste.

## 4 DESENVOLVIMENTO

### 4.1 Especificação dos Requisitos do Sistema

O levantamento de requisitos tem como base o regulamento da competição estudantil Formula SAE. O trecho do regulamento relativo ao controle eletrônico do acelerado está disponível nos anexos. Os requisitos serão discriminados em requisitos de hardware, software, documentação e desempenho sendo apresentados em tabelas, respectivamente.

A documentação é um item de grande relevância para o projeto, possuindo caráter que compromete a aplicação do sistema ETC. Entretanto, o regulamento é utilizado para reduzir e orientar o escopo e desenvolvimento deste projeto. Deste modo, a Tabela 2 que apresenta os documentos exigidos pela organização da competição não será atendida.

Tabela 2 – Tabela de requisitos de documentação.

Item	Requisito
IC1.11.1 e IC1.18	FMEA
IC1.11.1 e IC1.17	Intenção de uso
IC1.11.2	Divergências de regulamento para uso de ETC comercial
IC1.15.1	Tabela de relação BES e TPS (se aplicável)

Fonte: Autor (2017).

Os requisitos de hardware apresentados no regulamento tem base na estrutura necessária para compor o sistema ETC. Os itens especificados são relativos ao corpo da válvula do acelerador (TBI), sensor de posição da válvula do acelerador (TPS), pedal do acelerador, sensor de posição do pedal do acelerador (APPS), sensor do sistema de freio (BSE) e um dispositivo independente não programável. A Tabela 3 apresenta uma síntese dos requisitos relativo aos elementos eletrônicos e eletromecânicos do sistema.

O regulamento não especifica como deve ser implementado o tratamento das condições de erro, medições de tempo e cálculo de diferença entre sensores. Mas, define os valores de referência para que parâmetros sejam avaliados e implementados no controle eletrônico do acelerador. Na Tabela 4 os requisitos que se aplicam ao software foram agrupados e descritos de forma objetiva.

Outro aspecto importante para este sistema é relativo ao seu desempenho e comportamento sob solicitações dinâmicas, como acelerar, frear e mesmo controlar o motor em condição ociosa IDLE, também conhecida como marcha lenta. Portanto,

Tabela 3 – Tabela de requisitos de hardware.

<b>Elemento</b>	<b>Item</b>	<b>Requisito</b>
TBI	IC1.11.3	Duas fontes de energia
TBI	IC1.11.3	Retornar para posição de ocioso IDLE, quando não atuado
TPS	IC1.12.1	Medir todo o curso da TBI
TPS	IC1.12.2	Ser composto por dois sensores. Eles podem compartilhar a mesma fonte de tensão e referência apenas se efeitos de <i>offset</i> puderem ser detectados
TPS	IC1.12.6	Cada sensor deve ter conector individualmente permitindo a verificação de suas funções
Pedal	IC1.13.2	Retorno para posição de descanso quando não pressionado. Duas molas devem ser usadas, ambas com capacidade de retornar o pedal independente da outra
Pedal	IC1.13.2	Possuir um limitador de curso para proteger curso excessivo do sensor
APPS	IC1.13.1	Ser atuado pelo pedal do acelerador
APPS	IC1.13.1	Medir todo o curso do pedal
APPS	IC1.13.3	Ser composto por dois sensores com curvas de operação de inclinação positiva e com curvas de operação e/ou <i>offsets</i> diferentes
APPS	IC1.13.7	Cada sensor deve ter conector individualmente permitindo a verificação de suas funções
BES	IC1.14.1	Conter um sistema de medição do curso do pedal ou pressão do sistema de freio para verificar coerência
BES	IC1.14.2	Cada sensor deve ter conector individualmente permitindo a verificação de suas funções
Dispositivo	IC1.16	Um teste deve ser realizado para demonstrar sua funcionalidade na inspeção técnica
Dispositivo	IC1.16	Sugere-se, que seja enviado para o circuito não programável um sinal indicando 10% do TPS e freada brusca simultaneamente
Dispositivo	IC1.16	Um circuito independente não programável deve ser utilizado, tal que, quando uma freada brusca for detectada e o TPS indicar abertura maior de 10% por mais de um segundo corte o fornecimento de energia para bomba de combustível e TBI. Este dispositivo deve complementar as funcionalidades do ETC e ser reiniciado apenas pela chave geral primária

Fonte: Autor (2017).

Tabela 4 – Tabela de requisitos de software.

<b>Item</b>	<b>Requisito</b>
IC1.12.4 e IC1.13.5	Incoerência máxima entre sensores 10%
IC1.12.3 e IC1.13.4	Tempo máximo de incoerência 100ms
IC1.12.7 e IC1.13.8	Falha na transmissão do sinal ser tratada como incoerência
IC1.12.8, IC1.13.9 e IC1.14.4	Caso sinal analógico, considera-se falha circuito aberto ou curto circuito
IC1.12.9, IC1.13.10 e IC1.14.5	Caso sinal digital, descrever falhas potenciais, a estratégia de detecção e testes para detecção na FMEA
IC1.13.11	Qualquer algoritmo para controle da dinâmica do carro pode apenas reduzir a aceleração requerida
IC1.15.1	Interromper fornecimento de energia para TBI caso o freio mecânico seja acionado e o TPS indique uma abertura maior que o permitido por mais de um segundo
IC1.15.2	Interromper fornecimento de energia para TBI caso o TPS indique uma diferença maior de 10% da posição esperada por mais de um segundo
IC1.15.1	Um intervalo de um segundo é permitido para TBI voltar a posição ociosa. Caso falhe deve cortar a energia dos injetores de combustível e/ou centelha
IC1.15.2	O relacionamento entre BSE e TPS pode ser definido pela equipe utilizando uma tabela e sua funcionalidade deve ser demonstrada
IC1.15.2	Um erro na posição indicada pelo TPS e o ação resultante sobre o sistema de corte resultante deve ser demonstrado na inspeção técnica
IC1.15.2	Os injetores de combustível e sistema de ignição devem permanecer funcionando até que o TPS indique que o TBI está na posição IDLE ou menor

Fonte: Autor (2017).

foram estabelecidos requisitos de desempenho qualitativos. Os quais estão expostos na Tabela 5.

Tabela 5 – Tabela de requisitos de desempenho.

<b>Item</b>	<b>Requisito</b>
IDLE	Possibilidade de controle em regime estacionário
IDLE	Operação estável em regime estacionário
Aceleração	Resposta rápida, precisa e estável às solicitações do piloto
Freio	Resposta precisa e estável às solicitações do piloto

Fonte: Autor (2017).



## 4.2 Seleção dos Componentes de Hardware

Para selecionar os componentes de hardware são analisados os requisitos de projeto e escopo do projeto. Estabelecendo-se os critérios de seleção como sendo a disponibilidade de informações, aplicação e custo dos componentes. No final desta sessão é apresentada uma tabela de custo dos componentes.

Um componente chave para o desenvolvimento é o microcontrolador. Ele é responsável por realizar a leitura dos sensores, processar os dados, acionar o atuador, comunicar-se com a rede e realizar a verificar esses dados informando falhas e executar as tarefas devidas nesse caso.

Dentro dos critérios definidos para o projeto, as informações para comparação das plataformas de desenvolvimento do micro controladores são a resolução do conversor analógico digital (ADC), memória para gravação do código e armazenamento de dados (memória flash), suporte ao protocolo CAN, frequência de operação e custo. Abaixo a Tabela 6 compara três plataformas.

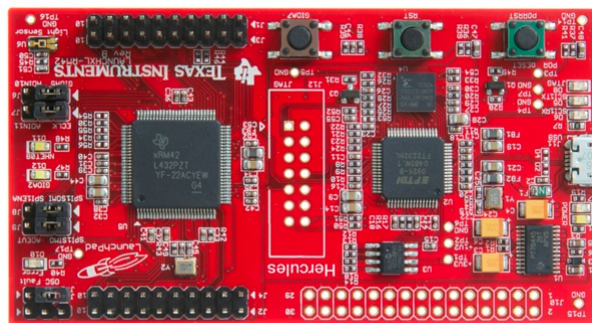
Tabela 6 – Comparação de microcontroladores

Processador	Resolução ADC [bits]	Memória [Kbytes]	Suporte CAN	Frequência [MHz]	Preço da plataforma [U\$]
AtMega2560	10	256	Não	16	38,5
TM4C123G	12	256	Sim	80	12,99
RM42L432	12	328	Sim	100	20,00

Fonte: Autor (2017).

A plataforma selecionado foi a do micro controlador RM42L432 por dispor de mais memória, mesmo com o segundo maior preço. Ele é mostrado na Figura 9.

Figura 9 – Hercules RM42x Kit de Desenvolvimento.



Fonte: Instruments (2017)

Para incorporar as atribuições do barramento CAN à rede, é necessário adicionar um transceptor CAN às saídas de comunicação CAN do microcontrolador. Ele modula a transmissão dos dados, em tensão e corrente, para que o barramento de dados adquira a característica diferencial.

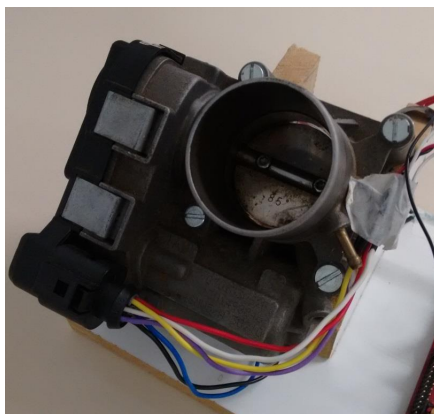
A seleção do transceptor baseou-se na disponibilidade do circuito integrado montados em placa com todos os componentes adicionais. Fato que direcionou a escolha para o módulo com circuito integrado TJA1050 produzido pela Philips, por ser um módulo produzido para aplicações de desenvolvimento, caso nosso. A Figura 27 no anexo A mostra o módulo selecionado.

Os componentes eletromecânicos como o TBI e o pedal do acelerador, fazem a interface do sistema ETC com o sistema de admissão de ar do motor e com a condução do motorista. É importante que eles sejam confiáveis quanto sua operação e atendam aos requisitos estabelecidos. O desenvolvimento desses componentes não faz parte do escopo do trabalho, mas a instrumentação de peças usadas no veículo foi considerada e se mostrou inviável pelo custo dos sensores e o tempo que seria despendido em sua implementação. Deste modo, optou-se pela aquisição de peças comerciais reaproveitadas, pois, tem um custo inferior se comparado a peças novas e no caso de não conformidade no funcionamento é possível a substituição. Apesar de serem itens de mercado, os fabricantes não disponibilizam informações como a curva de resposta do sensor e esta teve de ser obtida experimentalmente.

As peças eletromecânicas escolhidas são peças da quinta geração do veículo Gol, produzido pela Volkswagen. A Figura 28 do anexo B mostra a função dos fios de cada componente. As Figura 10a e Figura 10b são imagens dos componentes selecionados.

Figura 10 – Componentes eletromecânicos.

(a) TBI.



Fonte: Autor (2017)

(b) Pedal do acelerador.



Fonte: Autor (2017)

O acionamento do motor CC que movimenta a válvula do acelerador, necessita que utilizemos um amplificador no sinal de saída do microcontrolador. Dado o fato da corrente elétrica do microcontrolador ser limitada a 10 miliampères, enquanto o motor

pode necessitar de corrente superior a 2 Ampère. Outra característica relevante para escolha do amplificador é que o motor é do tipo servo e, portanto, tem dois sentidos de atuação. O sentido de atuação depende do sentido da corrente fornecida. Desse modo, o amplificador definido foi um amplificador em ponte H.

Apesar da disponibilidade comercial deste componente, optou-se por um amplificador em ponte H construído pelo autor. Pois este atende as condições demandadas pelo motor em situação de testes. No caso de aplicação de uso em campo deve ser substituído. O seu projeto do amplificador utilizado é apresentado no Apêndice A.

Os custos com aquisição dos componentes de hardware foram levantados e são expostos na Tabela 7.

Tabela 7 – Custo de componentes.

Item	Quantidade [un.]	Preço[R\$]	Frete[R\$]	Total
Plataforma	3	60	40	220,0
TBI	1	50,00	-	50,00
Pedal	1	50,00	-	50,00
Módulo CAN	2	3,84	-	7,68
Conector TBI	1	15,00	-	15,00
Total				342,68

Fonte: Autor (2017)

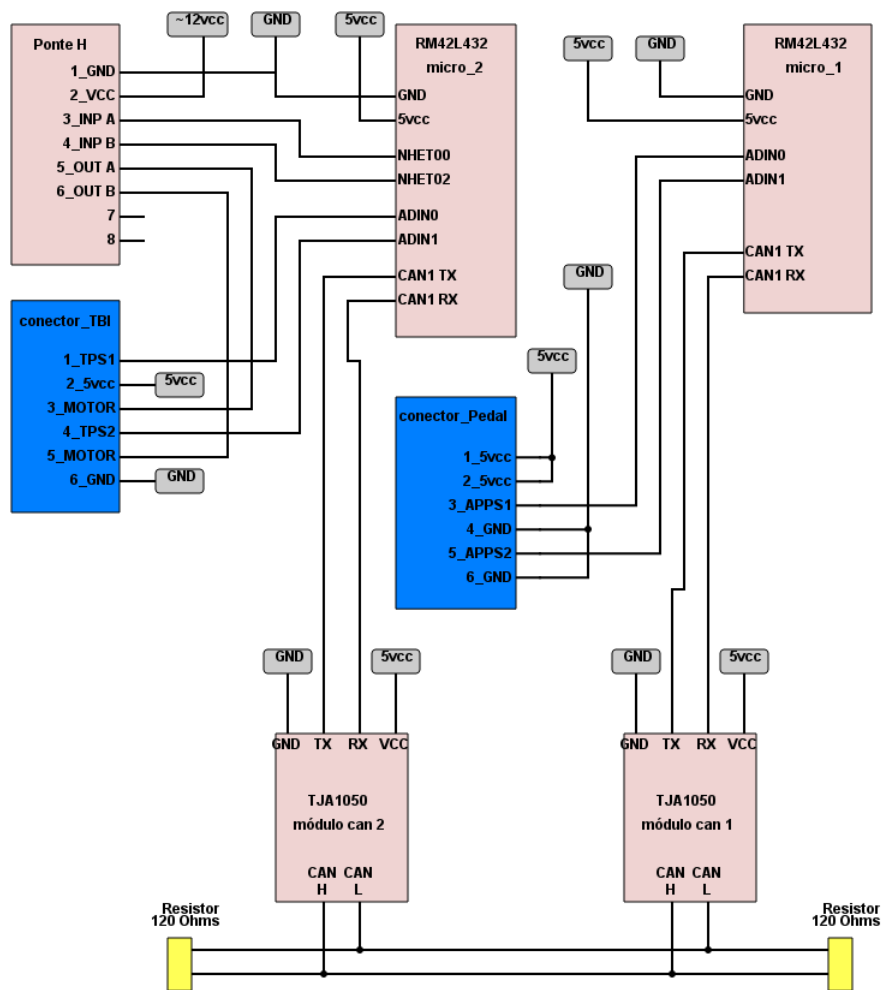
### 4.3 Projeto do Hardware e do Software

De modo a atender os requisitos definidos e orientar a conexão dos componentes será desenvolvido o projeto do Hardware e do Software. No projeto do hardware serão desenvolvidas uma tabela com faixa de operação e características elétricas dos componentes e o diagrama esquemático da ligação. No projeto do software serão apresentadas métodos e estratégias para medir com precisão os dados lidos nos sensores, identificar e tratar adequadamente as situações de erro e comunicar-se com segurança.

Os diagramas esquemáticos visam facilitar a compreensão da ligação entre os componentes de hardware. Para o presente projeto o diagrama da Figura 11, nele são representadas todas as ligações do sistema. Os blocos na cor rosa representam componentes, os blocos na cor azul são conectores de componentes, em cinza são indicadas tensão de alimentação dos componentes e em amarelo são resistores. Dentro de cada bloco são declarados os pinos e/ou a nomenclatura para identificação. As linhas indicam a ligação dos componentes, quando uma linha termina sobre outra com um círculo representa uma conexão.

O projeto proposto para este sistema segue conforme ilustrado na Figura 11, a

Figura 11 – Diagrama esquemático da ligação elétrica dos componentes.



Fonte: Autor (2017).

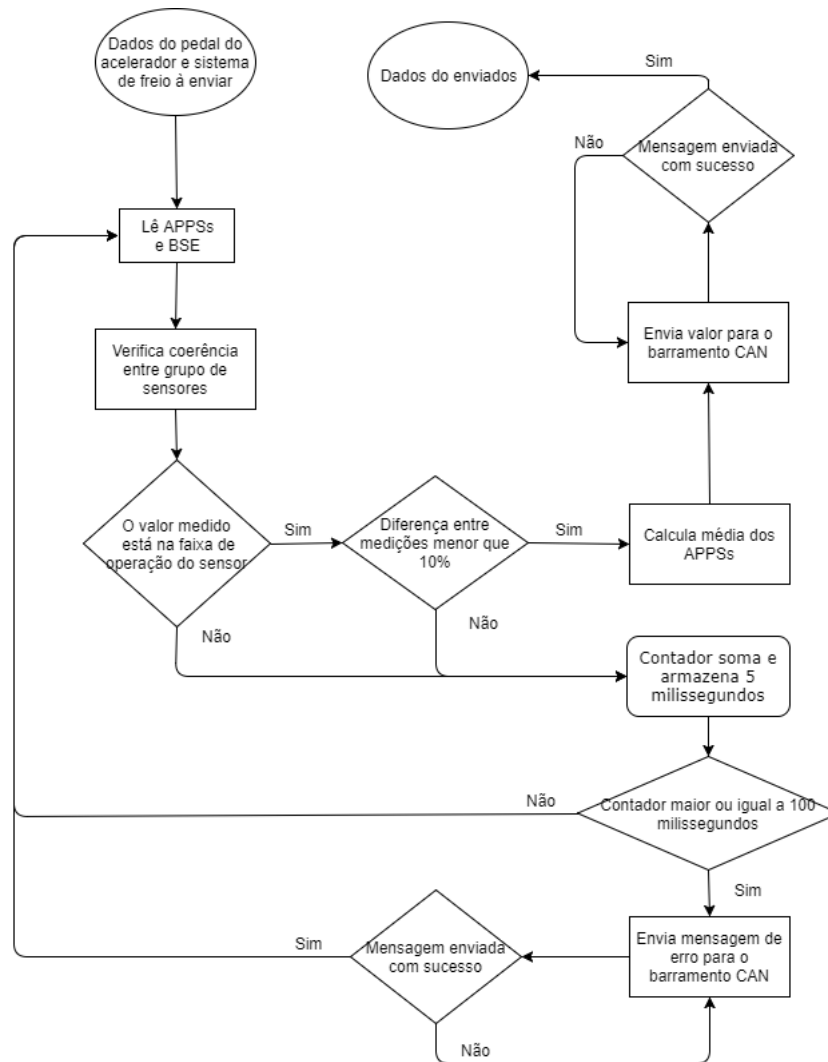
ideia propõem que dois microcontroladores sejam utilizados. Imaginando uma situação onde um deles esteja localizado mais a frente do veículo, o microcontrolado 1 (canto superior direito da figura), próximo aos pedais do acelerador, freio e embreagem. E o outro, microcontrolador 2 (centralizado na parte superior da figura) entre a região central e traseira próximo a TBI. Nesta configuração as atribuições de software são divididas entre dois microcontroladores.

Para esboçar quais atividades serão desempenhadas por cada microcontrolador serão apresentados fluxogramas. Estes tem o objetivo de representar graficamente o fluxo da informação e dos processos dentro do código que será desenvolvido. As figuras que irão compor o fluxograma são a elipse, que representa a tarefa início/fim, o retângulo com cantos retos, representa um processo que é descrito em seu interior, o losango indica uma tomada de decisão e a seta que aponta o sentido das informações.

No microcontrolador designado como microcontrolador 1, o processo inicia

com uma solicitação de informação da posição do pedal do acelerador e da atuação no sistema de freio. Uma leitura é realizada em cada um dos dois sensores APPS e do sistema de freio (pressão da linha ou posição do pedal) e os valores são enviados para verificar se as leituras entre de cada sensor do mesmo sistema estão dentro da faixa de operação e se há coerência entre elas. Caso exista, a média entre as leituras é realizada, caso contrário um contador começa a contar o tempo e solicita novas leituras e caso não se tornem coerentes dentro de 100 milissegundos uma mensagem de erro é enviada para o barramento CAN. Se a medição for boa, ou se tornar boa (coerente) após medições ruins os valores medidos são enviados. O esboço dos processos realizados pelo microcontrolador 1 são ilustrados pelo fluxograma da Figura 12.

Figura 12 – Fluxograma de esboço dos processos no microcontrolador 1.

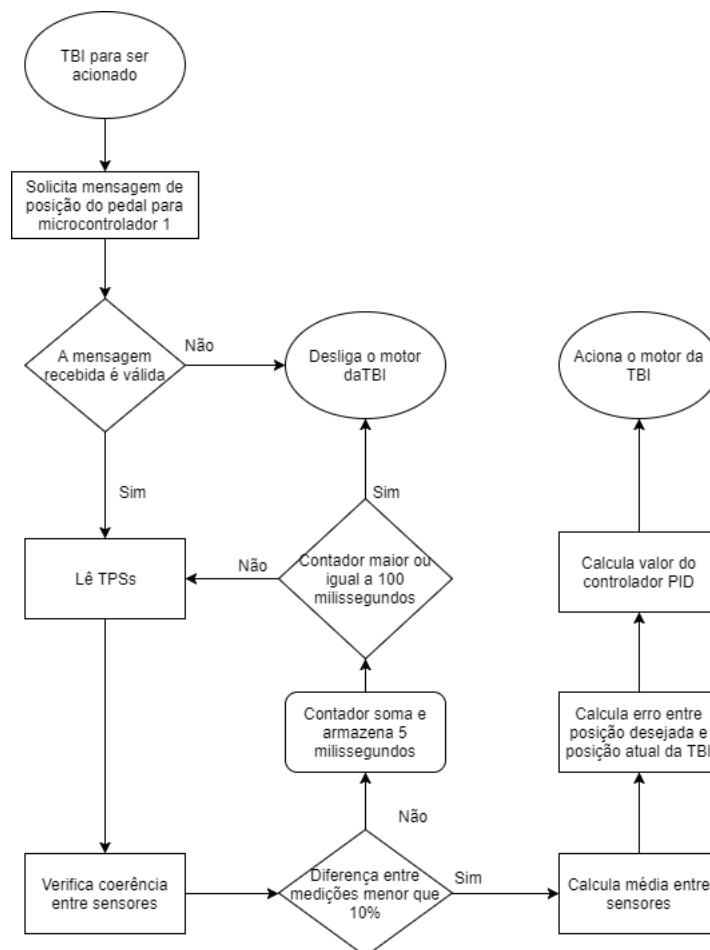


Fonte: Autor (2017)

As atividades realizadas pelo microcontrolador, designado microcontrolador 2, partem das informações recebidas do barramento CAN. Em seguida ele solicita

leitura dos sensores TPS e verifica a faixa de operação e coerência nos valores lidos e calcula a média. Então, são feitas duas comparações. A primeira verifica se o freio esta pressionado e a TBI aberta, caso positivo a TBI recebe um comando para ir para posição ociosa e tem o tempo de um segundo para tal. Se falhar um sinal é enviado para um dispositivo analógico que desligará a TBI. A segunda comparação é feita caso o freio não esteja pressionado, ela compara a posição do pedal com a posição da TBI, a diferença entre elas gera um erro. Este é enviado para um controlador que determina qual tensão será aplicada no motor da TBI e o aciona. O valor da média dos TPSs é enviado ao barramento CAN. Na Figura 13 é ilustrado pelo fluxograma dos processos realizados pelo microcontrolador 2.

Figura 13 – Fluxograma de esboço dos processos no microcontrolador 2.



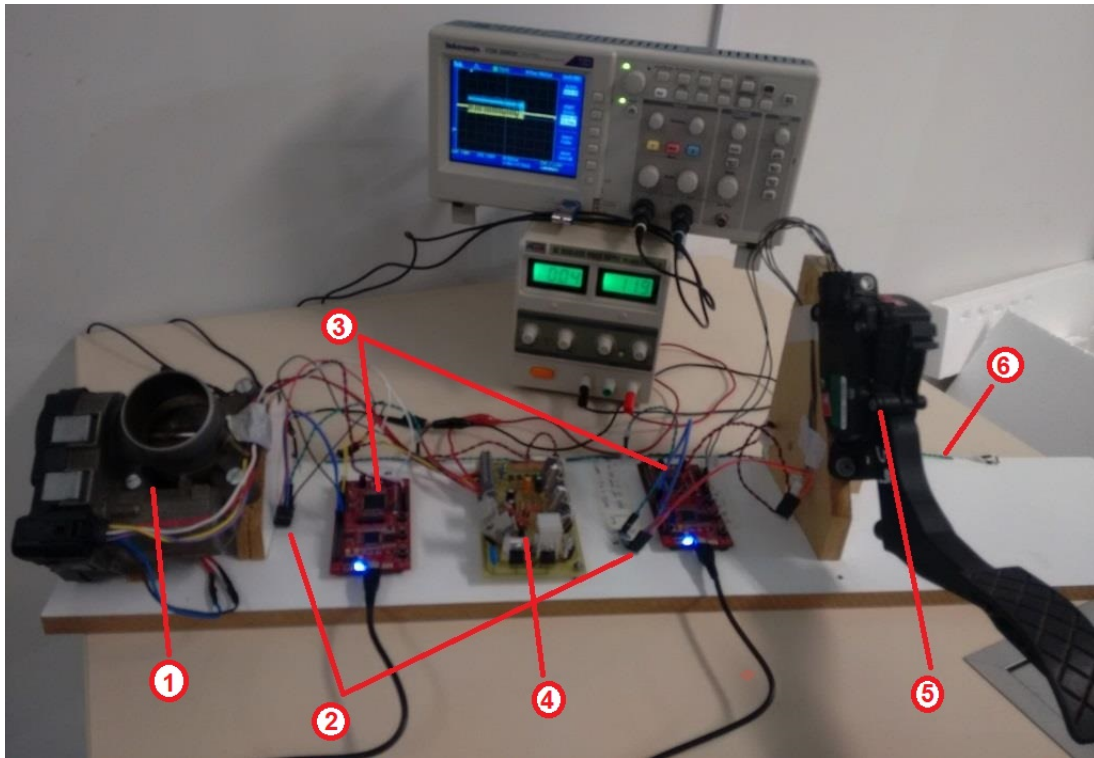
Fonte: Autor (2017)

#### 4.4 Desenvolvimento da Bancada Piloto

Para realizar os testes no código, obter os dados de componentes e do comportamento do sistema uma bancada de testes foi construída conforme a Figura 14. Seus objetivos são manter os componentes próximos melhorando a visualização

do comportamento em conjunto, evitar acidentes como quedas, falhas de conexões elétrica ou mesmo curto-circuitos evitando erros de instalação e também facilitar a medições.

Figura 14 – Bancada de teste para ETC.



Fonte: Autor (2017).

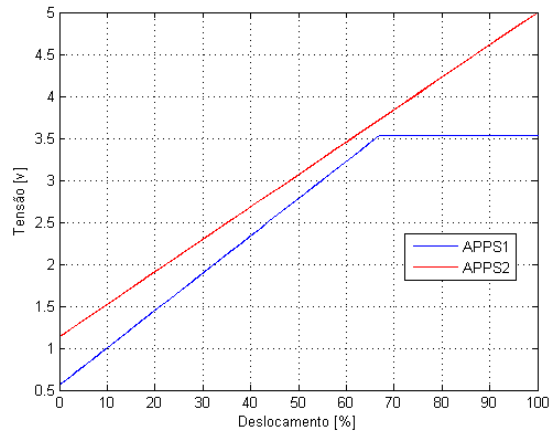
Os componentes do sistema foram fixados em uma placa de madeira. Na Figura 14, são identificados com indicação numérica a TBI número 1, o número 2 os módulos CAN, 3 os microcontroladores (esquerda microcontrolador 2 e direita microcontrolador 1), 4 o amplificado em ponte H com regulador de tensão para 5 volts (V) e 5 o pedal do acelerador. Na parte de trás da bancada foi posicionado os barramento CAN (número 6) e de alimentação proveniente do amplificador. Atrás da bancada estão a fonte de alimentação 12 V e sobre ela o osciloscópio.

A bancada será utilizada para obter dados das peças eletromecânicas adquiridas, pois estas não possuem um *datasheet* acessível. Desde modo, um algoritmo de testes foi implementado para adquirir valores medidos nos sensores e posteriormente tratados no software MATLAB. A curva de calibração dos sensores do pedal do acelerador e do sensores de posição da válvula borboleta foram obtidas experimentalmente.

Ensaio diferentes são necessários para os sensores APPS e TPS. No APPS o pedal é pressionado enquanto o microcontrolador armazena os dados com uma amostragem de 200 hertz (Hz), permitindo obter a relação entre tensão e deslocamento

do pedal. A Figura 15 pode-se ver o comportamento linear dos sensores e que um deles para de variar após, aproximadamente, 65%.

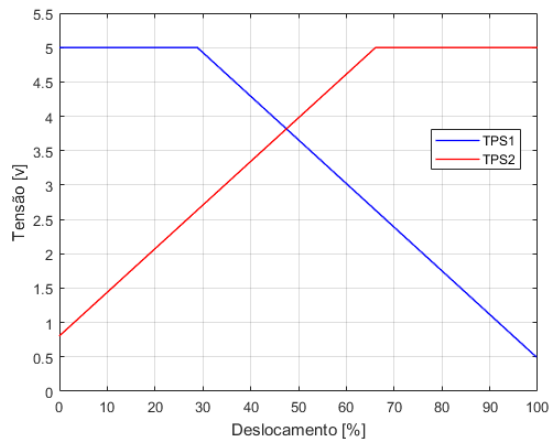
Figura 15 – Resposta dos sensores do pedal do acelerador ao deslocamento do pedal.



Fonte: Autor (2017).

No TPS é necessário movimentar a válvula do acelerador. Nesse caso aplica-se um sinal de teste com uma senoide de modo a variar a válvula em todo seu curso e ler o sinal. Como nenhum dos sensores mede toda a faixa de operação, faz-se necessário uma medição prática da variação angular da válvula para relacionar a variação de tensão e enfim obter as respectivas faixas de cada um dos sensores do TPS. Essa etapa consistiu em medir o deslocamento da válvula do acelerador no intervalo de IDLE a 0% onde os valores de tensão do sensor são conhecidos e permite estabelecer a relação dos sensores nos demais pontos. Na Figura 16, o comportamento dos sensores pode ser visto em função do deslocamento.

Figura 16 – Resposta dos sensores de posição da válvula do acelerador ao movimento angular da válvula.



Fonte: Autor (2017)

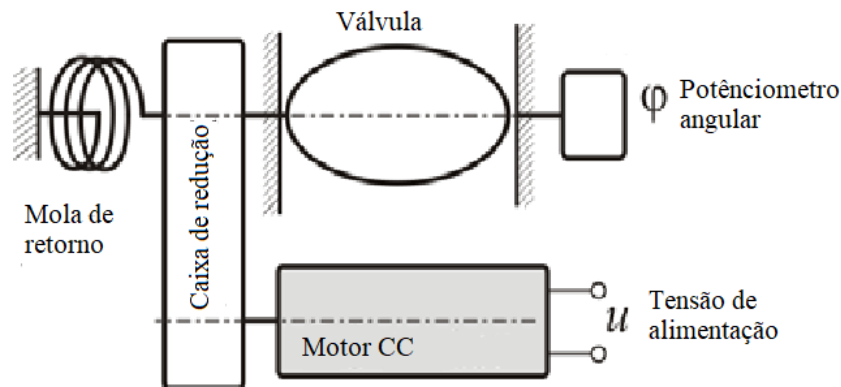


## 4.5 Projeto do Controlador

O projeto do controlador segue o método proposto por Nise (2013) apresentado na revisão teórica.

Com os requisitos de todo sistema definidos necessita-se separar quais requisitos estão a cargo do controlador. Recapitulemos o que é esperado que o sistema proposto realize: "Transformar a intensão de acelerar do condutor em um movimento rápido e preciso da válvula do acelerador que controla a entrada de ar no motor e, conseqüentemente, sua velocidade angular". Nosso interesse está no movimento angular rápido e preciso da válvula borboleta a partir da tensão aplicada no seu servo motor da TBI. Portanto, a TBI consiste na planta a ser controlada, que pode ser verificada na Figura 17.

Figura 17 – Planta TBI.



Fonte: Adaptado de Grelph e Lee (2008)

A Figura 17 mostra como estão conectados e como acontece a transmissão do movimento na TBI. Quando uma diferença de potencial é aplicada no motor CC de ímãs permanentes seu eixo que está conectado uma engrenagem rotaciona, movendo assim o par engrenado. A outra engrenagem do par está instalada no eixo da válvula borboleta que também se conecta a mola de retorno e ao potenciômetro angular.

Para que o motor consiga movimentar seu eixo é necessário vencer as forças de resistência imposta pela mola, atrito dos mancais e engrenamento e também a inércias .

Realizando o somatório dos torques no eixo do motor e aplicando as equações apresentadas na revisão teórica obtém-se a Equação 4.1. Dela segue o equacionamento para obtenção da função de transferência.

$$\sum T = T_{motor} - T_{Jeq} - T_{Ks} - T_{Mb} - T_{Mc} \quad (4.1)$$

Onde  $T_{motot}$  é o torque produzido pelo motot CC,  $T_{Jeq}$  é o torque devido momento de inércia equivalente do eixo do motor e eixo da válvula do acelerador,  $T_{Ks}$

é o torque devido a rigidez da mola,  $T_{Mb}$  é o torque devido ao amortecimento viscoso equivalente dos eixos e  $T_{Mc}$  é o torque devido ao atrito coulomb das engrenagens.

Desprezando a dinâmica elétrica, por ser muito mais rápida que a dinâmica mecânica (OGATA, 2010, p.85). Substituindo a tensão devido a força contra eletromotriz, Equação 2.5, e isolando a corrente de armadura na Equação 2.4 obtemos a Equação 4.2.

$$i_a(t) = \frac{u_a - K_{fem} \frac{d\varphi}{dt}}{R_a} \quad (4.2)$$

Aplicando Equação 4.2 a Equação 2.3 obtemos:

$$T_{motor} = K_v \cdot i_a(t) = K_v \cdot \frac{u_a - K_{fem} \frac{d\varphi}{dt}}{R_a} \quad (4.3)$$

Substituindo os torques da Equação 4.1 pelas suas componentes conforme as equações apresentadas na revisão teórica e isolando o torque do motor.

$$K_v \cdot \frac{u_a - K_{fem} \frac{d\varphi}{dt}}{R_a} = J_{eq} \frac{d^2\varphi(t)}{dt^2} + K_s\varphi(t) + b \frac{d\varphi(t)}{dt} + \text{sgn}(\varphi(t))\mu N \quad (4.4)$$

Aplicando a transformada de Laplace.

$$\frac{K_v}{R_a}(U_a(s) - K_{fem}s \cdot \Theta(s)) = J_{eq}s^2 \cdot \Theta(s) + K_s\Theta(s) + b \cdot s \cdot \Theta(s) + \text{sgn}(\Theta(s))\mu N \quad (4.5)$$

Separando a saída  $\Theta(s)$ , ângulo da válvula, sobre a entrada  $U_a(s)$ , tensão na armadura do servo motor, unindo os atritos de coulomb  $b$  e viscoso  $\mu N$  em um atrito equivalente  $M_{eq}$  e agrupando os termos de mesma potência, obtemos a função de transferência do sistema.

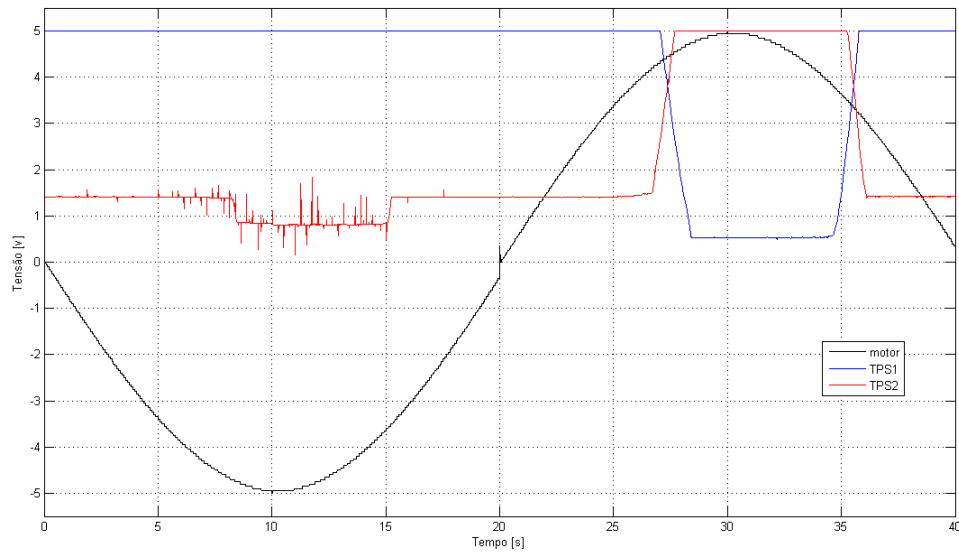
$$\frac{\Theta(s)}{U_a(s)} = \frac{1}{s^2 J_{eq} + s(M_{eq} + \frac{K_{fem}K_v}{R_a}) + K_s} \frac{K_v}{R_a} \quad (4.6)$$

Por meio da função de transferência obtida, verifica-se que se trata de um sistema de segunda ordem. Também observa-se com a dedução, que os coeficientes da função dependem de muitas variáveis, o que dificulta sua quantificação analiticamente. Deste modo, afim de conhecer a dinâmica do sistema ensaios experimentais serão realizados.

Inicialmente, um teste com entrada senoidal com frequência de 35 miliHertz (mHz) e amplitude de 5 volts foi aplicado na entrada do sistema, como mostra Figura 18. A partir dela pode-se gerar um gráfico com a entrada no eixo das abcissas e a saída no eixo das ordenadas, Figura 19.

Na Figura 19 duas não linearidades podem ser verificadas. A primeira, devido ao conjunto de engrenagens há presença de histerese, onde diferentes tensões no

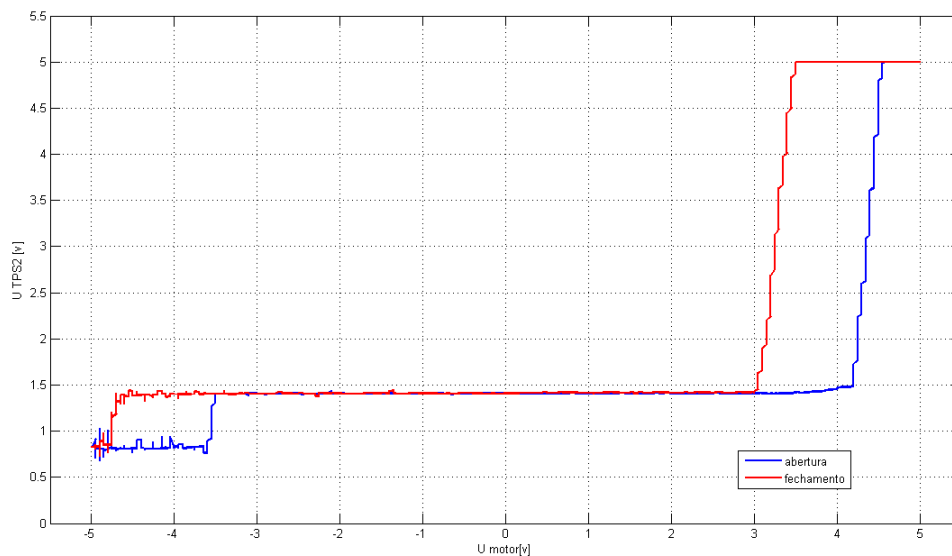
Figura 18 – Comportamento de sensores para uma entrada senoidal.



Fonte: Autor (2017)

motor resultam na mesma tensão do sensor TPS2. A segunda, devido a zona morta do motor, tensão inicial elevada para vencer a força da mola e atrito, resulta na faixa de -3,5 volts a 3 volts sem movimento da válvula do acelerador (sem variação nos sensores TPS).

Figura 19 – Resposta a entrada senoidal.



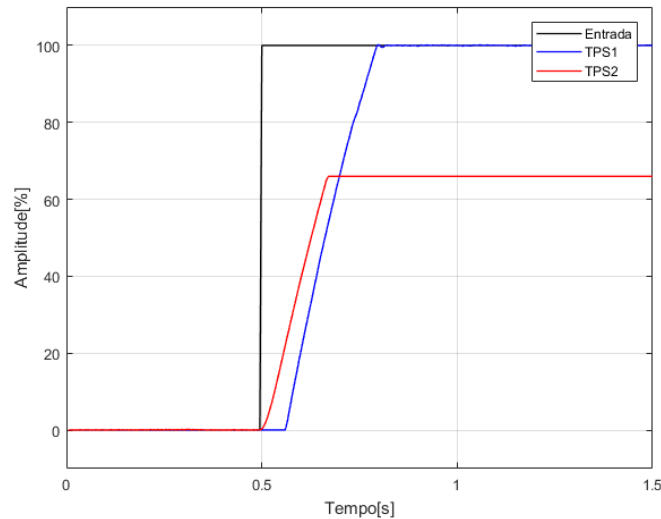
Fonte: Autor (2017)

Também, foram realizados ensaios com sinal de entrada degrau unitário. E dado o fato de existirem duas áreas de atuação, característica da planta devido ao

requisito de posição ociosa, o degrau foi aplicado nas duas direções, como exposto nas Figura 20a e Figura 20b. Por elas, verifica-se o comportamento do sistema de segunda ordem. Dado o sobressinal característico de sistema subamortecido, sinal da resposta ultrapassando sinal da entrada.

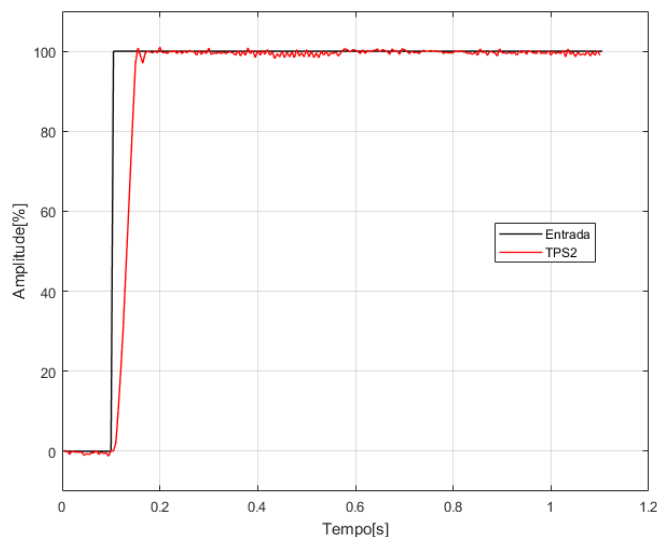
Figura 20 – Entrada testes degrau unitário

(a) Resposta ao degrau unitário.



Fonte: Autor (2017)

(b) Resposta ao degrau unitário negativo.



Fonte: Autor (2017)

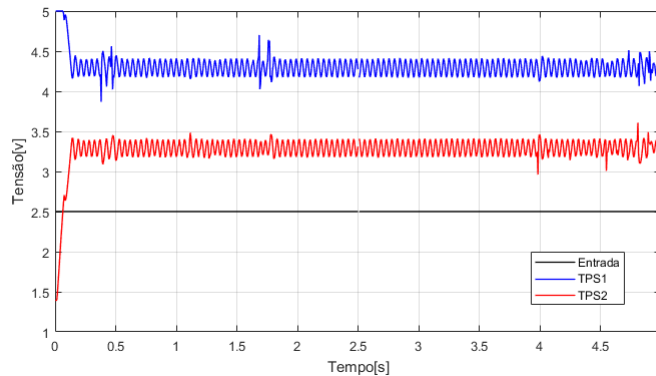
Na Figura 20a a resposta é formada pela contribuição dos dois sensores TPS. O TPS1 apresenta, aparentemente, um atraso, mas se dá em função de que ele mede apenas variações que ocorrem depois de 28% de abertura. Então, sua contribuição é no comportamento final da abertura. O TPS2 mede toda a variação do degrau negativo

da Figura 20b e a parte da abertura. Deste modo, sua atuação permite analisarmos o fechamento e o início da abertura.

Dado o fato das não linearidades do sistema e do desconhecimento das constantes da equação diferencial a linearização para projeto via lugar das raízes se torna inviável. Deste modo, para ajuste do controlador será aplicado o método de Ziegler e Nichols descrito na revisão teórica.

Para isto fixa-se o valor de entrada e varia-se o valor do ganho proporcional até que o sistema se torne criticamente estável, resposta estacionária oscilando. Na Figura 21 pode ver a entrada fixada em 2,5 volts e o sinal dos sensores TPS1 e TPS2 oscilando em um período contante, medido em 45 milissegundos, para o  $K_p$  de 480, ou seja, o ganho crítico  $K_{cr}$ .

Figura 21 – Sistema criticamente estável: Resposta oscilatório para  $K_p$  de 480.



Fonte: Autor (2017)

Aplicando a regra proposta para o controlador PI da Tabela 1 obtiveram-se as estimativas iniciais de  $K_p$ , Equação 4.7 e  $T_i$ , Equação 4.8. A relação entre  $K_p$  e  $T_i$  calcula-se o  $K_i$ , Equação 4.9, como segue abaixo. A partir deles, uma série de ensaios foi realizada no sistema de modo melhorar a sintonia das regiões de controle e os valores finais são apresentados nos resultados.

$$K_p = 0,45K_{cr} = 216 \quad (4.7)$$

$$T_i = \frac{1}{1,2}P_{cr} = 0,0375 \quad (4.8)$$

$$k_i = \frac{K_p}{T_i} = \frac{216}{0,0375} = 5760 \quad (4.9)$$

## 5 RESULTADOS

O presente trabalho tem como principal resultado a implementação da bancada de testes juntamente com o *hardware* e *software* desenvolvidos. Este conjunto permite executar e avaliar o sistema de controle eletrônico do acelerador previamente a testes incorporando outros elementos como motor e ECM.

A especificação dos requisitos orientou a seleção de componentes de hardware que, com exceção dos sensores do sistema de freio e do dispositivo não programável, incorporam as características desejadas. Atendendo aos requisitos IC1.11.3, IC1.12.1, IC1.12.2, IC1.12.6, IC1.13.1, IC1.13.2, IC1.13.3 e IC1.13.7.

Desse modo, foi possível implementar um programa computacional que integra parte as funções necessárias para que o sistema opere dentro do regulamento. Apesar das funções estarem incorporadas ao código apenas os itens IC1.12.3, IC1.12.4 e IC1.12.7 foram validados. Ou seja, foram os únicos testados que atenderam aos requisitos.

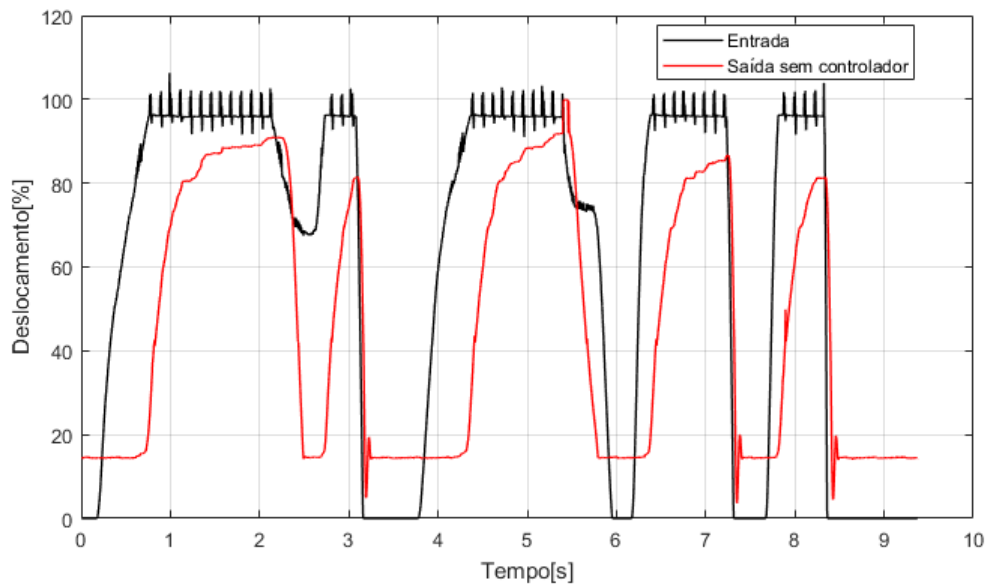
Dentre as etapas do desenvolvimento, a implementação do sistema de controle é uma das principais, pois ela visa dar aplicação a bancada de testes e ser incorporado as funções do software. O sistema de controle passou por repetidos testes na bancada para buscar a melhor sintonia do controlador PI. As Figura 22 e Figura 23 permitem comparar entrada e resposta de saída sem e com controlador, respectivamente.

Observando pontos comuns aos gráficos apresentados, percebe-se que o sinal de entrada oscila quando está em regiões constantes. O período da oscilação é aproximadamente de 100 milissegundos e amplitude de 10%. Sua origem não foi estudada, mas tem característica de ruído elétrico. Uma hipótese levantada atribui a interferência devido comunicação universal assíncrona UART, entre o microcontrolador e o computador utilizada para imprimir dados lidos na tela do computador.

O comportamento do sistema sem controlador, se refere a um controlador proporcional de ganho unitário (não intergere no valor de erro), Figura 22. Nele verifica-se um atraso da resposta em torno de 500 milissegundos, movimentação da resposta apenas a entradas elevadas, 90% de deslocamento do pedal, sendo difícil estabilizar em diferentes posições de deslocamento. Esses aspectos são atribuídos devido a falta de controle, ou seja o ganho proporcional igual a um sobre o valor do erro não é suficiente para que o sistema opere de maneira satisfatória.

Para o sistema operando com controle PI, o atraso é aproximadamente 250 milissegundos para os deslocamentos de 20 a 40%. Em razão do elevado ganho

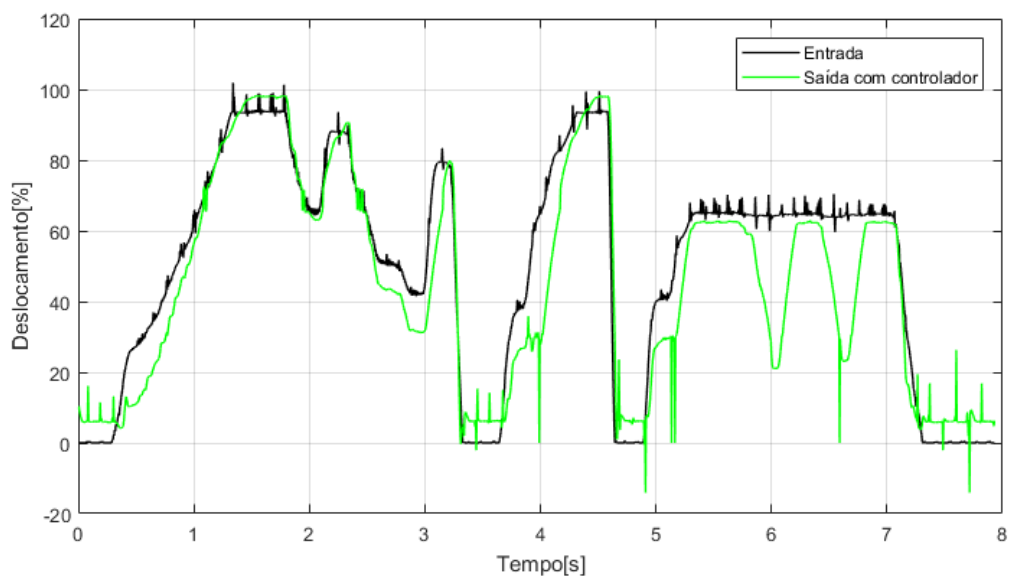
Figura 22 – Sistema operando sem controle.



Fonte: Autor (2017)

proporcional. E conforme ocorrem variações no sinal de entrada verifica-se que o erro reduz gradativamente ficando sempre próximo de zero devido a ação do controle integral. Entretanto, algumas variações súbitas são vistas entre 6 e 7 segundos. Estas acontecem devido a limitação de ganho imposta à ação integral. As oscilações entre 0 e 20% são devido ao controle dessa região não estar bem sintonizado, ele oscila sem levar o erro para zero.

Figura 23 – Sistema operando com controlador.



Fonte: Autor (2017)

Os valores para os ganhos proporcional e derivativo aplicados na Figura 23 são relativos a duas regiões de operação. A primeira delas é a região que varia da posição ociosa à 100% de abertura, cujos ganhos são 278,9 proporcional e 2841,4 integral. A segunda região varia da posição ociosa à 0% de abertura cujos ganhos são 341,1 proporcional e 3061,2 integral.

Outro resultados de interesse é o funcionamento do barramento CAN, configurado para taxa de transmissão de 500Kbits por segundo. Nele, circulam as mensagens de posição do pedal e de posição da válvula do acelerador, cujos identificadores são 1 e 2.



## 6 CONCLUSÕES

O desenvolvimento deste trabalho possibilitou a implementação do sistema de controle eletrônico do acelerador em uma bancada de testes incorporando requisitos de projeto definidos pelo regulamento da competição estudantil de formula SAE.

Devido a sua relação com outros sistemas e componentes do veículo, o projeto deve considerar aspectos relevantes para segurança e desempenho. Fornecendo recursos para que estes sejam validados sob todas as condições necessárias.

Antes de iniciar o desenvolvimento do projeto, foi realizada uma revisão das principais características de sistemas de controle, de MCIs e do protocolo de comunicação CAN. Os requisitos de projeto foram levantados para direcionar a elaboração das etapas seguintes. Inicialmente foram selecionados os componentes que compunham o sistema, elaborados esquemas para construção da bancada e do programa. A partir da bancada de testes foram feitos ensaios para levantar parâmetros de ajuste de controlador proporcional integral. Com a implementação do controlador PI ao sistema foi reduzido o tempo de atraso e erro em estado estacionário. Entretanto, o sistema ainda permite aprimoramento na sintonia do controlador, principalmente na região de operação que varia de totalmente fechado a posição de ocioso. Também verificou-se a ação da função de incoerência, que atuou corretamente para os sensores válvula do acelerador TPS. Para os sensores de posição do pedal APPS, foi possível verificar que uma oscilação nas leituras do mesmo o tiravam do estado de erro antes de que o processo de falha encerra-se desativando a TBI.

Como sugestão de trabalhos futuros, a bancada e o código podem ser utilizados para validar os demais requisitos colocados pelo regulamento. Incorporar um pedal adicional, para simular o sistema de freio, e o dispositivo não programável. Construir uma nova bancada para iniciar testes de operação em conjunto com um MCI, analisando e estudando melhores características de operação do controlador. Realizar a produção de uma FMEA visando mitigar erros que não estão previstos pelo regulamento, além do fato desta ser um item requerido para viabilizar a aplicação do sistema na competição.

## REFERÊNCIAS

- ALVEZ, J. **Equipe Fórmula CEM 19**. Joinville: [s.n.], 2016.
- AURUM, A.; WOHLIN, C. **Engineering and Managing Software Requirements**. Germany: Springer, 2005.
- BOSCH, R. **Manual de Tecnologia Automotiva**. São Paulo: Edgard Blücher, 2005.
- BRUNETTI, F. **Motores de Combustão Interna**. São Paulo: Edgard Blücher, 2012.
- CAPELLI, A. **Eletrônica Automotiva: Injeção eletrônica, arquitetura do motor e sistema embarcados**. São Paulo: Érica, 2010.
- CIRCUITS, A. of. **TJA1050 CAN Transceiver Module**. Art Of Circuits, 2017. Disponível em: <<http://artofcircuits.com/product/tja1050-can-transceiver-module>>. Acesso em: 22-nov-2017.
- CORRIGAN, S. **Introduction To The Controller Area Network (CAN): Application Report**. Texas Instruments, 2002. Disponível em: <<http://www.ti.com/lit/an/sloa101b/sloa101b.pdf>>. Acesso em: 16-out-2017.
- DENTON, T. **Automobile Electrical**. Great Britain: Elsevier, 2004.
- G1. **Toyota pagará US\$ 1,2 bilhão por problemas de acelerador nos EUA**. Auto Esporte, 2014. Disponível em: <<https://goo.gl/JqtALg>>. Acesso em: 21-out-2017.
- GRELPH, R.; LEE, B. Identification, modeling and control of electronic throttle. Korea, 2008. Disponível em: <<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.556.6540&rep=rep1&type=pdf>>. Acesso em: 2017-out-20.
- GUIMARAES, A. d. A. **Eletrônica Embarcada Automotiva**. São Paulo: Érica, 2011.
- HEYWOOD, J. B. **Internal combustion engine fundamentals**. United States of America: McGraw-Hill, 1988.
- INSTRUMENTS, T. **Hercules RM42x LaunchPad Development Kit**. Texas Instruments, 2017. Disponível em: <<http://www.ti.com/tool/launchxl-rm42>>. Acesso em: 17-out-2017.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARTIZATION. **ISO 11898-3: Road vehicles – controller area network (can) – part 3: Low-speed, fault-tolerant, medium-dependent interface**. [S.l.], 2006. 25 p. Disponível em: <<https://www.iso.org/standard/36055.html>>.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARTIZATION. **ISO 11898-2: Road vehicles – controller area network (can) – part 2: High-speed medium access unit**. [S.l.], 2016. 30 p. Disponível em: <<https://www.iso.org/standard/67244.html>>.

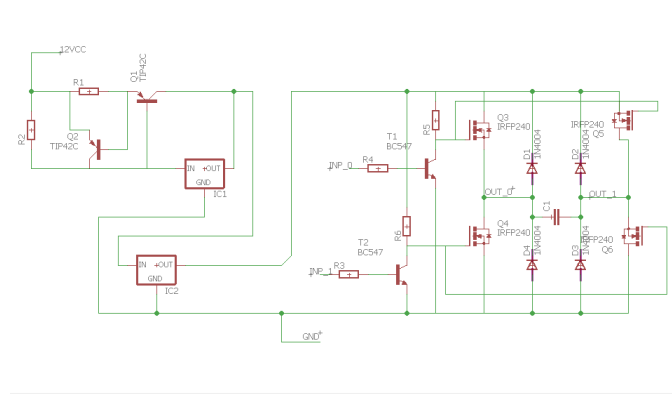
- LARMAN, C. **Utilizando UML e Padrões**. São Paulo: Bookman, 2007.
- NISE, N. S. **Engenharia de Sistema de Controle**. Rio de Janeiro: LTC, 2013.
- OGATA, K. **Engenharia de controle moderno**. São Paulo: Pearson, 2010.
- PAHL, G. et al. **Engineering design: a systematic approach**. London: Springer, 2007. 149-151 p.
- PETRONI, H. F. **Carros autônomos: capacitar-se é preciso**. [S.l.]: SAE Brasil, 2014.
- RAVAGNANI, V. **Diagrama Elétrico Injeção Eletrônica - Sistema IAW 4GV equipados em veículos como o Voyage G5 1.6**. Oficina Brasil, 2015. Disponível em: <<https://goo.gl/e7tm33>>. Acesso em: 12-jun-2017.
- SHARON, D. Drive-by-wire. **Futures**, v. 15, n. 6, p. 491 – 498, 1983. ISSN 0016-3287. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0016328783900861>>.
- SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERING. **SAE J 2284**: High speed can (hsc) for passenger vehicle applications. [S.l.], 2001. 17 p. Disponível em: <[http://standards.sae.org/j2284\\_200105/](http://standards.sae.org/j2284_200105/)>.
- SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERING. **SAE J 1939**: Serial control and communications heavy duty vehicle network - top level document. [S.l.], 2013. 580 p. Disponível em: <[http://standards.sae.org/j1939\\_201308/](http://standards.sae.org/j1939_201308/)>.
- XAVIER, C. M. d. S. **Gerenciamento de projetos**: como definir e controlar o escopo do projeto. São Paulo: Saraiva, 2009.
- ÇENGEL, Y. A.; BOLES, M. A. **Termodinâmica**. [S.l.]: McGraw-Hill, 2006.

## APÊNDICE A

O amplificador em ponte H desenvolvido constitui-se de duas partes principais.

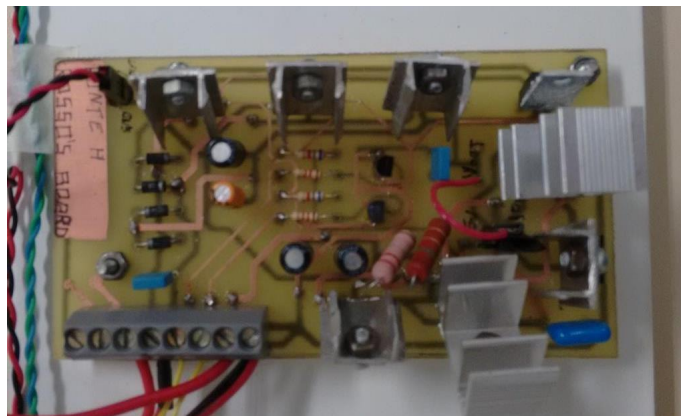
A primeira, regula a tensão, protege para curto-circuito na entrada e conta com um circuito auxiliar para fornecer mais corrente. São utilizados os dois transistores TIP41C, um regulador linear LM7810, um regulador linear LM7805 e resistores para polarização do circuito. Na segunda, o sinal de entrada é amplificado para saída com a corrente requerida pela carga. O sinal que entra em INP\_0 e INP\_1 passa por transistores de junção bipolar MPSA14, que amplifica a corrente e polarizam um par de transistores de efeito de campo IRFZ22N, de dois pares disponíveis, sendo que o par polarizado determinará o sentido da corrente. Abaixo o diagrama esquemático e o amplificador são mostrados.

Figura 24 – Diagrama esquemático o amplificador.



Fonte: Autor (2017).

Figura 25 – Amplificador em ponte H.



Fonte: Autor (2017).

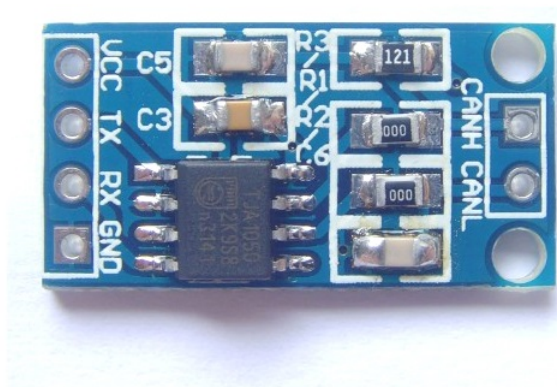
## ANEXO A

Figura 26 – Protótipo da equipe Fórmula CEM na 13ª edição da competição Formula SAE Brasil.



Fonte: Alvez (2016)

Figura 27 – Módulo CAN TJA 1050.

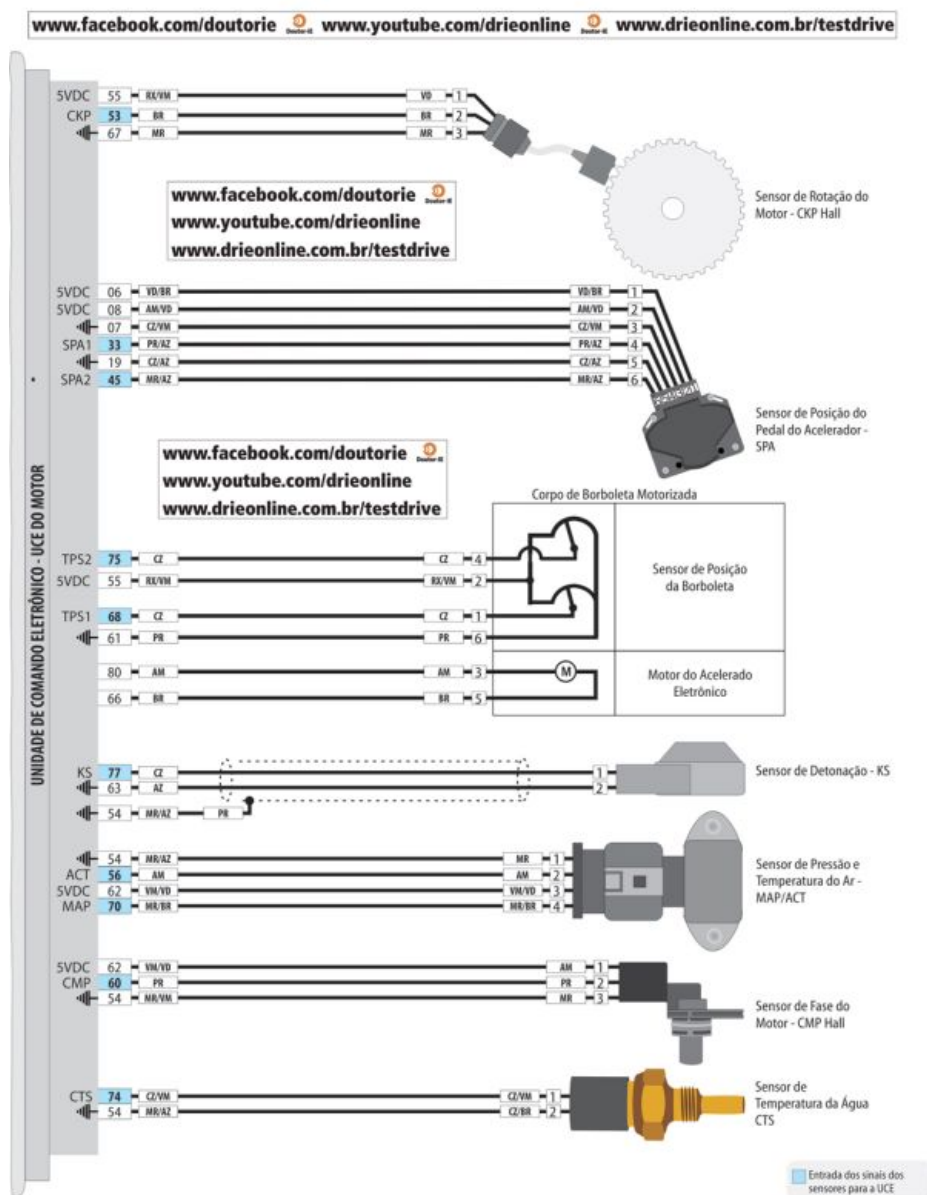


Fonte: Circuits (2017)

## ANEXO B

Figura 28 – Diagrama esquemático da ligação elétrica de componentes da injeção eletrônica do veículo Gol 5ª geração.

02 / 05



Fonte: Ravagnani (2015)

**ANEXO C**

- e. **Pressure Regulator** – A fuel pressure regulator must be fitted between the high and low pressure sides of the fuel system in parallel with the DI boost pump. The external regulator must be used even if the DI boost pump comes equipped with an internal regulator.
- f. **Required Test** – Prior to the tilt test specified in T8.5, engines fitted with mechanically actuated fuel pumps must be run to fill and pressure the system downstream of the high pressure pump.

#### **IC1.10 Crankcase / engine lubrication venting**

IC1.10.1 Any crankcase or engine lubrication vent lines routed to the intake system must be connected upstream of the intake system restrictor.

IC1.10.2 Crankcase breathers that pass through the oil catch tank(s) to exhaust systems, or vacuum devices that connect directly to the exhaust system, are prohibited.

#### **IC1.11 Electronic Throttle Control - ETC**

IC1.11.1 Electronic Throttle Control (Drive-by-wire control) of the throttle position is permitted if a technical description of the system and FMEA is submitted prior to the event which describes the expected failure modes and how the strategy to detect and respond to those failure modes is implemented. The purpose of this is to show that good engineering practices have been applied to the ETC. If an adequate FMEA is not presented, then the team will be required to convert to a mechanical throttle. In any case, rules IC1.11 – IC1.16 apply if an electronic throttle is implemented. A notice of intent is required for any team wishing to follow the ETC regulations. See IC1.17 and IC1.18 for submission requirements.

IC1.11.2 An ETC system that is commercially available, but does not comply with the regulations, may be used, if approved by the competition organizer. To obtain approval, the team must:

- Submit a rules question to ask your event organizers if that ETC system may be used.
- Include the specific ETC rule(s) that the commercial system deviates from.
- Include sufficient technical details of these deviations to allow the acceptability of the commercial system to be determined.

IC1.11.3 The electronic throttle must automatically close (return to idle) when power is removed from it.

IC1.11.4 The electronic throttle must use at least two (2) sources of energy capable of returning the throttle to the idle position. One of the sources may be the device that normally actuates the throttle, e.g. a DC motor, but the other device(s) must be a throttle return spring that can return the throttle to the idle position in the event of a loss of actuator power.

Springs in the TPS are not acceptable throttle return springs

#### **IC1.12 Throttle Position Sensor – TPS**

IC1.12.1 The TPS must measure the position of the throttle or the throttle actuator. Throttle position is defined as percent of travel from fully closed to wide open where 0% is fully closed and 100% is fully open.

IC1.12.2 At least two separate sensors have to be used as TPSs. The TPSs may share the same supply and reference lines only if effects of supply and/or reference line voltage offsets can be detected.

IC1.12.3 If an implausibility occurs between the values of the two TPSs and persists for more than 100msec, the power to the electronic throttle must be immediately shut down.



- IC1.12.4 Implausibility is defined as a deviation of more than 10% throttle position between the sensors or other failure as defined in IC1.12. Use of larger values may be considered on a case by case basis and require justification in the FMEA.
- IC1.12.5 If three sensors are used, then in the case of a TPS failure, any two TPSs that agree within 10% throttle position may be used to define the throttle position target and the 3<sup>rd</sup> TPS may be ignored.
- IC1.12.6 Each TPS must have a separate detachable connector that enables a check of these functions by unplugging it during Technical Inspection, else, an inline switchable break-out box must be made available during Technical Inspection that allows disconnection of the each TPS signal.
- IC1.12.7 The TPS signals must be sent directly to the throttle controller using an analogue signal or via a digital data transmission bus such as CAN or FlexRay. Any failure of the TPSs or TPS wiring must be detectable by the controller and must be treated like implausibility.
- IC1.12.8 When an analogue signal is used, e.g. from a 5V sensor, the TPSs will be considered to have failed when they achieve an open circuit or short circuit condition which generates a signal outside of the normal operating range, for example <0.5V or >4.5V. The circuitry used to evaluate the sensor will use pull down or pull up resistors to ensure that open circuit signals result in a failure being detected.
- IC1.12.9 When any kind of digital data transmission is used to transmit the TPS signal, the FMEA study must contain a detailed description of all the potential failure modes that can occur, the strategy that is used to detect these failures and the tests that have been conducted to prove that the detection strategy works. The failures to be considered must include but are not limited to the failure of the TPS, TPS signals being out of range, corruption of the message and loss of messages and the associated time outs.

### **IC1.13 Accelerator Pedal Position Sensor – APPS**

- IC1.13.1 The APPS must be actuated by a foot pedal. Pedal travel is defined as percent of travel from a fully released position to a fully applied position where 0% is fully released and 100% is fully applied.
- IC1.13.2 The foot pedal must return to its original position when not actuated. The foot pedal must have a positive stop preventing the mounted sensors from being damaged or overstressed. Two (2) springs must be used to return the throttle pedal to the off position and each spring must be capable of returning the pedal to the off position with the other disconnected.

**The springs in the APPSs are not acceptable pedal return springs.**

- IC1.13.3 At least two entirely separate sensors have to be used as APPSs. The sensors must have different transfer functions, each having a positive slope sense with either different gradients and/or offsets to the other(s).

**NOTE:** The intent of this rule is that in a short circuit the APPSs will only agree at 0% pedal position.

- IC1.13.4 If implausibility occurs between the values of the two APPSs and persists for more than 100msec, power to the electronic throttle must be immediately shut down.
- IC1.13.5 Implausibility is defined as a deviation of more than 10% pedal travel between the sensors or other failure as defined in IC1.13. Use of larger values may be considered on a case by case basis and require justification in the FMEA.

- IC1.13.6 If three sensors are used, then in the case of an APPS failure, any two APPSs that agree within 10% pedal travel may be used to define the throttle position target and the 3rd APPS may be ignored.
- IC1.13.7 Each APPS must have a separate detachable connector that enables a check of these functions by unplugging it during Technical Inspection, else, an inline switchable break-out box must be made available during Technical Inspection that allows disconnection of each APPS signal.
- IC1.13.8 The APPS signals must be sent directly to the throttle controller using an analogue signal or via a digital data transmission bus such as CAN or FlexRay. Any failure of the APPSs or APPS wiring must be detectable by the controller and must be treated like an implausibility.
- IC1.13.9 When an analogue signal is used, e.g. from a 5V sensor, the APPSs will be considered to have failed when they achieve an open circuit or short circuit condition which generates a signal outside of the normal operating range, for example  $<0.5V$  or  $>4.5V$ . The circuitry used to evaluate the sensor will use pull down or pull up resistors to ensure that open circuit signals result in a failure being detected.
- IC1.13.10 When any kind of digital data transmission is used to transmit the APPS signal, the FMEA study must contain a detailed description of all the potential failure modes that can occur, the strategy that is used to detect these failures and the tests that have been conducted to prove that the detection strategy works. The failures to be considered must include but are not limited to the failure of the APPS, APPS signals being out of range, corruption of the message and loss of messages and the associated time outs.
- IC1.13.11 Any algorithm or electronic control unit that can manipulate the APPS signal, for example for vehicle dynamic functions such as traction control, may only lower the total driver requested torque and must never increase *torque* unless it is exceeded during a gearshift. Thus the drive torque which is requested by the driver may never be exceeded.
- IC1.14 Brake System Encoder – BSE**
- IC1.14.1 A brake system encoder to measure brake pedal position or brake system pressure must be fitted to check for plausibility.
- IC1.14.2 The BSE must have a separate detachable connector that enables detection of error states and the response of the ECU to be checked by unplugging it during Technical Inspection, otherwise an inline switchable break-out box must be made available during technical inspection that allows disconnection of each BSE signal.
- IC1.14.3 The BSE signals must be sent directly to the throttle controller using an analogue signal or via a digital data transmission bus such as CAN or FlexRay. Any failure of the BSE or BSE wiring that persists more than 100msec must be detectable by the controller and must be treated like an implausibility such that power to the electronic throttle is immediately shut down.
- IC1.14.4 When an analogue signal is used, e.g. from a 5V sensor, the BSE will be considered to have failed when they achieve an open circuit or short circuit condition which generates a signal outside of the normal operating range, for example  $<0.5V$  or  $>4.5V$ . The circuitry used to evaluate the BSE will use pull down or pull up resistors to ensure that open circuit signals result in a failure being detected.
- IC1.14.5 When any kind of digital data transmission is used to transmit the BSE signal, the FMEA study must contain a detailed description of all the potential failure modes that can occur, the strategy that is used to detect these failures and the tests that have been conducted to prove that the detection strategy works. The failures to be considered must include but are not limited to the failure of the BSE, BSE

signals being out of range, corruption of the message and loss of messages and the associated time outs.

### **IC1.15 ETC Plausibility Checks**

- IC1.15.1 The power to the electronic throttle must be immediately shut down, if the mechanical brakes are actuated and the TPS signals that the throttle is open by more than a permitted amount for more than 1(one) second.

An interval of 1 (one) second is allowed for the throttle to close (return to idle), failure to achieve this within the required interval must result in immediate shut down of the power to the fuel injectors and/or the ignition system.

The permitted relationship between BSE and TPS may be defined by the team using a table, but the functionality must be demonstrated at Technical Inspection.

- IC1.15.2 The power to the electronic throttle must be immediately shut down, if throttle position differs by more than 10% from the expected target TPS position for more than 1 second.

An interval of 1 (one) second is allowed for the difference to reduce to less than 10%, failure to achieve this within the required interval must result in immediate shut down of the power to the fuel injectors and/or the ignition system.

An error in TPS position and the resultant system shutdown must be demonstrated at Technical Inspection.

The electronic throttle and fuel injector/ignition system shutdown must remain active until the TPS signals indicate the throttle is at or below the unpowered default position, for at least 1 (one) second.

### **IC1.16 Brake System Plausibility Device for IC Engines with ETC**

A standalone non-programmable circuit must be used on the car such that when braking hard (for example  $>0.8g$  deceleration but without locking the wheels) and when the TPS shows that the throttle is greater than 10% open, the power to the electronic throttle and fuel pump must be completely shut down and this must result in the electronic throttle closing to the idle position. The action of removing power to the electronic throttle and fuel pump must occur if the implausibility is persistent for more than one (1) second. This device must be provided in addition to the plausibility checks which are carried out in the ETC which interprets the drivers throttle request and controls the engine throttle position. The Brake Plausibility Device may only be reset by power cycling the Primary Master Switch.

The team must devise a test to prove this required function during Technical Inspection. However, it is suggested that it should be possible to achieve this by sending an appropriate signal to the non-programmable circuit that represents a throttle position of more than 10% whilst pressing the brake pedal to a position or with a force that represents hard braking.

### **IC1.17 ETC – Notice of Intent**

- IC1.17.1 Notice of Intent - Teams planning to build an electronically controlled throttle complying with IC1.11-IC1.16 for entry into a North American competition must notify the Rules Committee of their intent by the date specified in the action deadlines for the competition. Include a short paragraph detailing your team's outline design and showing that you have the capability to design the electronic systems. Your "Notice of Intent" must include the email addresses and phones numbers of the team members who can answer any questions the Committee may have about your proposal.



IC1.17.2 Failure to submit a notice of intent by the due date will mean that teams may only compete with a mechanical throttle.

IC1.17.3 Competitions may choose to apply limits to the number of ETC entries that they allow and therefore the Notice of Intent may be used to screen which teams are accepted to build an ETC to the appropriate regulations.

#### **IC1.18 Failure Modes and Effects Analysis (FMEA)**

IC1.18.1 Assuming that the notice of intent is accepted, teams must submit a complete failure modes and effects analysis (FMEA) of the Electronic Throttle Control prior to the event which includes a description of the system.

IC1.18.2 A template including required failures to be described will be made available online – see your competition website for details.

Do not change the format of the template. Pictures, schematics and data sheets to be referenced in the FMEA have to be included in the FMEA on additional table pages

IC1.18.3 Submission of the FMEA

Failure Modes and Effects Analysis (FMEA) must be submitted in compliance with the procedure and by the deadline published on the website of the competition your team is attending.

IC1.18.4 Penalty for Late Submission or Non-submission

Late submission of the FMEA will require the team to revert to a mechanical throttle arrangement.

## **ARTICLE 2: FUEL AND FUEL SYSTEM**

### **IC2.1 Fuel**

The basic fuel available at competitions in the Formula SAE Series is unleaded gasoline. For the FSAE North American competitions this should have an octane rating of 91 (R+M)/2 (approximately 95 RON) minimum and for other competitions, the unleaded gasoline that will be available will be published by the relevant organizing committee. However, the basic fuel may be changed at the discretion of the organizing body. Other fuels may be available at the discretion of the organizing body.

IC2.1.1 Unless otherwise announced by the individual organizing body, the fuel at competitions in the Formula SAE Series will be provided by the organizer.

IC2.1.2 During all performance events the cars must be operated with the fuels provided by the organizer at the competition.

IC2.1.3 Nothing may be added to the provided fuels. This prohibition includes nitrous oxide or any other oxidizing agent.

**NOTE 1:** Teams are advised that the fuel supplied in the United States is subject to various federal and state regulations and may contain ethanol. The exact chemical composition and physical characteristics of the available fuel may not be known prior to the competition.

**NOTE 2:** The fuels provided at Formula SAE Michigan and Formula SAE Lincoln are expected to be 93 and 100 octanes [(R+M)/2] gasoline and E-85. Fuel types are subject to change. Consult the individual competition websites for fuel types and other information.