

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”

**FACULDADE DE ENGENHARIA
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

CESAR AUGUSTO CORRÊA

**ESTUDO DE ESTRATÉGIAS DE CALIBRAÇÃO DE MOTORES PARA UM
VEÍCULO FORMULA SAE**

Ilha Solteira
2025

CESAR AUGUSTO CORRÊA

**ESTUDO DE ESTRATÉGIAS DE CALIBRAÇÃO DE MOTORES PARA
UM VEÍCULO FORMULA SAE**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentada à Faculdade de Engenharia de
Ilha Solteira – UNESP como parte dos
requisitos para obtenção do título de bacharel
em Engenharia Mecânica

Orientador: Miguel Ângelo Menezes

Ilha Solteira
2025

FICHA CATALOGRÁFICA

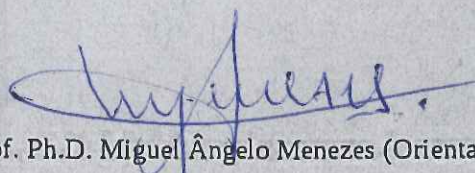
Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

- C854e Correa, Cesar Augusto.
Estudo de estratégias de calibração de motores para um veículo Fórmula SAE / Cesar Augusto Correa. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2025
58 f. : il.
- Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Mecânica) -
Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia, Ilha Solteira,
2025
- Orientador: Miguel Ângelo Menezes
- Inclui bibliografia
1. Motor de combustão interna. 2. Calibração de motores. 3. Formula SAE. 4.
Unidade de controle eletrônico.

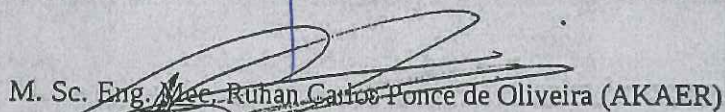
ATA DE DEFESA DO TRABALHO DE GRADUAÇÃO

Aos 5 dias do mês de julho do ano de dois mil e vinte e cinco, as 14h00min, por videoconferência, no Departamento de Engenharia Mecânica, do Campus da UNESP, da Faculdade de Ilha Solteira, o discente **Cesar Augusto Corrêa**, matriculada sob o número 191051144, tendo como banca examinadora, o orientador Prof. Ph.D. Miguel Ângelo Menezes, o Doutorando em Engenharia Mecânica M. Sc. Ruhan Carlos Ponce de Oliveira (AKAER) e o Engenheiro Mecânico Roberto Barone de Lima Filho (Agroterenas), apresentou o Trabalho de Graduação intitulado: "*Estudo de Estratégias de Calibração de Motores para um Veículo Formula SAE*", obtendo o CONCEITO Aprovado e NOTA FINAL: (9,5) Nove e Meio.

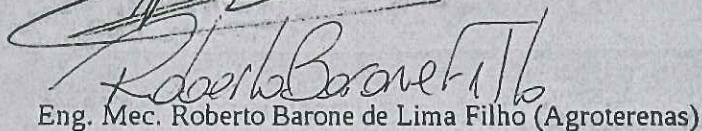
Por ser verdade, os membros da banca examinadora e o discente assinam em seguida.



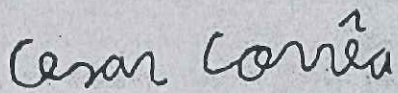
Prof. Ph.D. Miguel Ângelo Menezes (Orientador)



M. Sc. Eng. Mec. Ruhan Carlos Ponce de Oliveira (AKAER)



Eng. Mec. Roberto Barone de Lima Filho (Agroterenas)



Cesar Augusto Corrêa (Discente)

AGRADECIMENTOS

Inicialmente gostaria de agradecer imensamente a minha família e minha namorada, que estiveram sempre me apoiando e dando suporte para que esse sonho fosse possível de ser realizado, sem vocês isso não teria de forma alguma se viabilizado e acontecido. Na sequência, eu sou muito grato a todas as pessoas com quem, eu tive a oportunidade de aprender e conviver nos longos anos em que estive na equipe Fênix Racing Formula SAE, que além de me apoiarem na realização deste trabalho, muito do que desenvolvi profissionalmente e pessoalmente devo a equipe e as situações vividas ao longo de todos esses anos. Por fim, gostaria de agradecer também a todos os que estiveram comigo e que tive a grande oportunidade de dividir o local que chamei de casa todos esses anos: Aos meus amigos e agregados da gloriosa Rep. Tente, o meu muito obrigado por tornarem todos esses anos únicos e aprender a cada dia com cada um de vocês.

RESUMO

Este trabalho tem como principal finalidade a exploração e análise do funcionamento das estratégias de calibração de motores de injeção eletrônica programável para um motor de combustão interna de um veículo formula SAE. A calibração de motores é uma área ampla quando se trata da otimização e estudo para compreender o comportamento de um motor a combustão interna. Para isso, ao longo do presente trabalho são estudadas algumas estratégias de calibração que também são utilizadas no meio industrial, mas com particularidades, devido a injeção programável, que a equipe possui até o presente momento, fazendo o uso das ferramentas *TUNERSTUDIO* para a calibração e do *MEGALOGVIEWER* para interpretação e análise dos dados, de modo que em futuros trabalhos essas estratégias possam ser refinadas e aprimoradas. Como resultado do presente trabalho e das análises e das estratégias de calibração realizadas, portanto, resultaram algumas ferramentas importantes, de modo que a equipe futuramente possa explorar ainda mais e compreender, como o sistema como um todo irá responder, conforme sejam realizadas modificações na calibração, visando extrair um melhor desempenho e uma maior confiabilidade do sistema de funcionamento do motor.

Palavras-chave: Motor de combustão interna, calibração de motores, Formula SAE, Unidade de controle eletrônico.

ABSTRACT

The main purpose of this work is to explore and analyze the operation of programmable electronic fuel injection engine calibration strategies for an internal combustion engine in a Formula SAE vehicle. Engine calibration is a broad area when it comes to optimizing and studying the behaviour of an internal combustion engine. To this end, throughout this work we will study some calibration strategies that are also used in the industrial environment, but with particularities due to the programmable injection that the team has so far, using the TUNERSTUDIO tools for calibration and MEGALOGVIEWER for data interpretation and analysis so that in future work these strategies can be refined and improved. As a result of this work and the analyzes and calibration strategies carried out, some important tools resulted, so that the team in the future can further explore and understand how the system as a whole will respond, as modifications are made to the calibration, aiming to extract better performance and greater reliability from the engine operating system.

Keywords: Internal Combustion Engine, Engine Calibration, Formula SAE, Electronic Control Unit

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Equipe Fênix Racing na competição de Formula SAE.....	14
Figura 2 – Localização de Componentes do motor.....	15
Figura 3 – Funcionamento e eventos em um motor de 4 cursos.....	19
Figura 4 – Diagrama P-V motor ciclo otto ideal.....	20
Figura 5 – Sensor <i>Narrowband</i>	23
Figura 6 – Sensor <i>Wideband</i>	24
Figura 7 – Relação ar-combustível com potência e economia.....	25
Figura 8 – Estrutura interna de uma <i>ECU</i>	25
Figura 9 – Transferência de calor em função da razão de equivalência.....	27
Figura 10 – Relação consumo específico e <i>air fuel ratio</i>	28
Figura 11 – Esquema controle malha fechada sonda.....	29
Figura 12 – Esquema injeção motor <i>PFI</i>	30
Figura 13 – Esquema injeção motor <i>DI</i>	31
Figura 14 – Fluxograma de trabalho.....	34
Figura 15 – Interface <i>Tunerstudio</i>	35
Figura 16 – Interface <i>MegaLogViwer</i>	35
Figura 17 – Proposta 1 de correção por aceleração.....	38
Figura 18 – Proposta 2 de correção por aceleração.....	38
Figura 19 – Proposta 3 de correção por aceleração.....	39
Figura 20 – Proposta 1 de correção por aceleração.....	40
Figura 21 – Proposta 2 de correção por aceleração.....	41
Figura 22 – Proposta 3 de correção por aceleração.....	41
Figura 23 – Proposta 1 de controle de idle por combustível.....	43
Figura 24 – Proposta 2 de controle de idle por combustível.....	43
Figura 25 – Proposta 3 de controle de idle por combustível.....	44
Figura 26 – Proposta 1 de controle de idle por avanço.....	45
Figura 27 – Proposta 2 de controle de idle por avanço.....	46
Figura 28 – Controlador ativo sem ganhos aplicados.....	47
Figura 29 – Proposta ganho proporcional 50%.....	48
Figura 30 – Proposta ganho proporcional 80%.....	49
Figura 31 – Proposta ganho proporcional 50% e integral 10%.....	50
Figura 32 – Proposta ganho proporcional 50% e integral 20%.....	50
Figura 33 – Proposta ganho proporcional 80% e integral 10%.....	51

Figura 34 – Proposta ganho proporcional 80% e integral 20%.....	51
Figura 35 – Proposta valores de combustível durante <i>Warmup</i>	53
Figura 36 – Estratégia de combustível durante <i>Warmup</i> em funcionamento.....	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Configuração utilizada para os testes.....	33
Tabela 2 – Variáveis utilizadas para os testes.....	36

LISTA DE SÍMBOLOS

AF_s Relação ar-combustível estequiométrica

ECU *Electronic Control Unit*

MAP *Manifold air pressure*

PMS – Ponto morto superior

PMI – Ponto morto inferior

r Relação de compressão

TPS *Throttle position sensor*

X_b Fração de massa de ar-combustível queimado

Z_b Torque

$\dot{W}_b$ Potência

PFI *Port fuel injection*

DI *Direct injection*

θ : ângulo de manivela

θ_s : ângulo de manivela de início da liberação de energia

θ_d : ângulo de manivela de duração da liberação de energia

λ Lambda

Φ Razão de equivalência

SUMÁRIO

1	Introdução.....	13
	1.1 Competição Formula SAE e a Equipe Fênix Racing.....	13
	1.2 Componentes e o funcionamento de um motor ciclo Otto...	14
	1.3 Conceitos e ferramentas básicas de Calibração.....	20
2	Objetivos.....	32
3	Metodologia.....	33
	3.1 Características do motor utilizado.....	33
	3.2 Condução dos testes realizados.....	34
	3.3 Ferramentas e <i>Softwares</i> utilizados.....	34
4	Análise e discussão dos resultados.....	36
	4.1 Variáveis de interesse.....	36
	4.2 Correção por aceleração	37
	4.3 Controles de marcha lenta.....	42
	4.4 Controle de malha fechada (PID) para sonda lambda.....	47
	4.5 Teste de combustível durante <i>Warmup</i>	52
5	Conclusões.....	55
6	Trabalhos Fututros.....	55
7	Referências.....	57

1 Introdução

A cada dia que passa, é notório a situação com que o desenvolvimento das tecnologias focadas no ramo automobilístico, que o funcionamento e o comportamento dos motores de veículos ficam cada vez mais aprimorados e refinados em relação ao quesito confiabilidade e desempenho. Para que isso seja possível, no âmbito industrial há uma grande necessidade de obtenção de formas de controlar os motores através das unidades centrais eletrônicas. Daí, surgiu então a área de calibração de motores para que seja possível acompanhar o que as legislações e o mercado exigem nesse ramo.

Quando se trata do trabalho de calibração de motores, existem muitas possibilidades de utilização, possuindo diferentes tipos tanto de hardwares quanto de softwares que viabilizam o desenvolvimento da área que é de suma importância para o mercado brasileiro, em que ainda é muito comum em veículos com motores de combustão interna.

No presente trabalho são abordados conceitos, teorias e assuntos que envolvem a área da calibração e sua aplicabilidade no âmbito de competições de veículos *formula SAE*; onde se tem como foco principal o desempenho e, em que não se trabalham outras questões importantes que são consideradas no âmbito das empresas automobilísticas, mas que ainda sim são muito importantes no projeto, quando se pensa na construção de um veículo *formula SAE*.

1.1 Competição de Formula SAE e a equipe Fênix Racing

A **Formula SAE Brasil** é uma competição universitária que desafia estudantes de engenharia a projetar, construir e testar protótipos de carros do tipo *formula*. Organizada pela SAE Brasil, a competição visa integrar teoria e prática, estimulando a inovação e o desenvolvimento de habilidades técnicas e de gestão em alunos de todo o Brasil. Dentro da competição existem várias regras que devem ser seguidas e cumpridas pelas equipes para que seja viável a competição em pista com o veículo.

A Equipe Fênix Racing Formula SAE inspirou a realização deste trabalho dada a experiência proporcionada pela equipe. Fundada em 2009, a equipe, desde sua primeira participação em 2011, esteve presente na competição em

todas as edições presenciais e também competições online. Atualmente, a equipe é composta por alunos de graduação dos mais variados cursos da UNESP – Campus de Ilha Solteira. Pode-se ver protótipo FX12 de 2024, juntamente com a equipe na Figura 1.

Figura 1 – Equipe Fênix Racing na competição de Formula SAE



Fonte: Próprio Autor.

1.2 Componentes e funcionamento de um motor Ciclo Otto

O motor de combustão interna tem como definição teórica, segundo Heywood, uma máquina térmica que é capaz de utilizar o calor gerado pela reação de combustão em energia cinética, e que gera um trabalho mecânico.

Na seção atual são apresentados os principais componentes de um motor a combustão interna e suas funções, além do funcionamento de um motor de combustão interna que utiliza do ciclo Otto para seu funcionamento.

1.2.1 Principais componentes de um motor à combustão interna

O motor de combustão interna é um dispositivo que possui vários componentes que são essenciais para o seu bom funcionamento e cada um com sua devida importância. Na sequência alguns desses componentes são

discorridos, cujas definições apresentadas são conceitos empregados por Heywood (1988) e Pulkrabek (2004).

Antes da descrição de cada um, é interessante de observar a alocação desses componentes no motor. A Figura 2, ilustrada por Pulkrabek (2004), auxilia em um melhor entendimento da posição desses componentes no motor.

Figura 2 – Localização de Componentes do motor

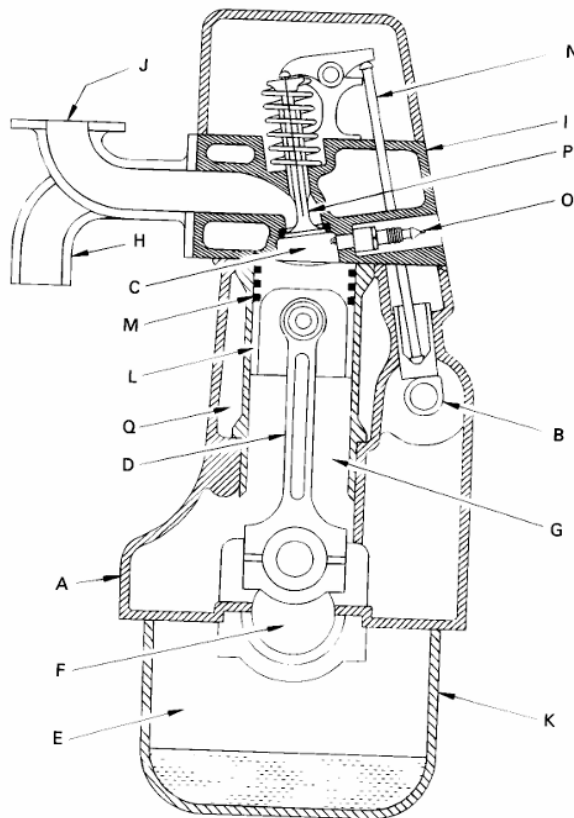


Figure 1-15 Cross-section of four-stroke cycle S1 engine showing engine components: (A) block, (B) camshaft, (C) combustion chamber, (D) connecting rod, (E) crankcase, (F) crankshaft, (G) cylinder, (H) exhaust manifold, (I) head, (J) intake manifold, (K) oil pan, (L) piston, (M) piston rings, (N) push rod, (O) spark plug, (P) valve, (Q) water jacket.

Fonte: PULKRABEK (2004).

1.2.1.1 Pistão

Componente do motor alojado no cilindro que se movimenta linearmente, transmitindo as forças geradas pela combustão da mistura ar combustível na câmara de combustão para o virabrequim; habitualmente esse componente é fabricado de ferro fundido, aço ou alumínio.

1.2.1.2 Anéis de vedação

Anéis metálicos são utilizados ao redor da cabeça do pistão na superfície lateral e fabricados em aço cromado polido. São utilizados como um componente de vedação também para selar a câmara de combustão. O motor utilizado no presente trabalho utiliza anéis de aceite para garantir uma boa vedação, minimizar consumo de óleo e maximizar a compressão do motor.

1.2.1.3 Cilindro

Tratam-se de geometrias circulares no bloco do motor, nos quais os pistões executam movimento para frente e para trás. As paredes do cilindro são altamente brunidas para que se tenha um bom acabamento e geralmente utilizam materiais mais resistentes.

1.2.1.4 Biela

É uma haste a qual tem por finalidade realizar a conexão mecânica do pistão com o virabrequim rotativo do motor, esse componente geralmente é fabricado de aço ou ligas forjadas.

1.2.1.5 Câmara de Combustão

A câmara de combustão é o volume entre a extremidade do cilindro e a face do pistão, que varia entre um volume mínimo quando o motor está no TDC (parte superior do motor) e volume máximo quando o motor no BDC (parte inferior do motor).

1.2.1.6 Bloco do motor

O bloco do motor é a parte maior no qual vários componentes estão contidos, sendo que a maioria dos blocos são geralmente feitos em alumínio ou ferro fundido.

1.2.1.7 Comando de válvulas

O comando de válvulas é utilizado para a realização da abertura e fechamento das válvulas do motor (através de bielas, balancins e tuchos), podendo ser mecânicos ou hidráulicos e, geralmente são fabricados em aço forjado.

1.2.1.8 Virabrequim

É o eixo giratório do motor pelo qual o trabalho resultante da combustão é fornecido aos sistemas externos e é conectado ao bloco do motor pelos mancais principais, sendo geralmente na sua fabricação utilizado aço forjado ou ferro fundido.

1.2.1.9 Radiador

Componente que é responsável por garantir a troca de calor e o resfriamento do motor para que o mesmo trabalhe em sua temperatura ideal de funcionamento, a maioria dos radiadores são trocadores de calor do tipo núcleo tubo e aletas.

1.2.1.10 Coletor de Admissão

É o componente que tem como principal finalidade fornecer a entrada de ar para o interior do motor e, em alguns casos, tem-se também um pouco de entrada de combustível através dos *runners* em motores PFI.

1.2.1.11 Coletor de Escape

É o componente do motor responsável pelo transporte dos gases de escape residuais da combustão para fora do cilindro, geralmente fabricados em ferro fundido.

1.2.1.12 Cabeçote

É o componente que fecha o motor contendo uma parte do volume da câmara de combustão, em alguns motores as válvulas e eixos de comando estão posicionados nesse local. Geralmente são fabricados de ferro fundido ou alumínio e são parafusados no bloco do motor.

1.2.1.13 Cáster

Reservatório de óleo normalmente fixado na parte inferior do bloco do motor.

1.2.1.14 Bicos Injetores e bomba de combustível

São componentes responsáveis pela alimentação de combustível dos motores, os bicos injetores responsáveis por pulverizar o combustível e a bomba de combustível por gerar pressão suficiente em toda a linha para que o combustível consiga ser pulverizado pelos injetores de uma maneira uniforme para todo o sistema.

1.2.1.15 Bobina de ignição

É o dispositivo responsável por criar através de uma descarga de alta tensão um arco elétrico que irá mandar um pulso para as velas de ignição gerarem a centelha. É, o dispositivo responsável por gerar a centelha que irá fornecer a energia de ativação para o processo da reação química de combustão com o arco elétrico enviado pela bobina.

1.2.1.16 Corpo de Borboleta

É o componente que controla a quantia de massa de ar fresco que é admitida por um motor, podendo através desse componente realizar também a modelagem de pressão do coletor de admissão.

1.2.1.17 Bomba de óleo e bomba d'água

Componentes utilizados para realizar a circulação desses fluidos no interior do motor, geralmente são componentes mecânicos, mas que também podem ser comandados eletricamente.

1.2.2 Funcionamento de um motor ciclo Otto

Segundo Pulkrabek (2004) o motor ciclo Otto é um motor de combustão interna que possui seu funcionamento através da ignição por centelha que possui 4 principais cursos de operação e 6 eventos, sendo eles:

Curso de admissão: Instante no qual se tem a entrada da mistura ar e combustível para a câmara de combustão devido ao diferencial de pressão que o deslocamento do cilindro do ponto morto superior para o ponto morto inferior gera.

Curso de compressão: Onde a mistura anteriormente admitida é comprimida pelo pistão logo após o fechamento da válvula de admissão, próximo ao fim desse curso é dado início ao processo de combustão.

Combustão: ponto esse em que ocorre a ignição que dá início à propagação da chama de combustão e desencadeia a reação de queima, aumentando pressão e temperatura na câmara.

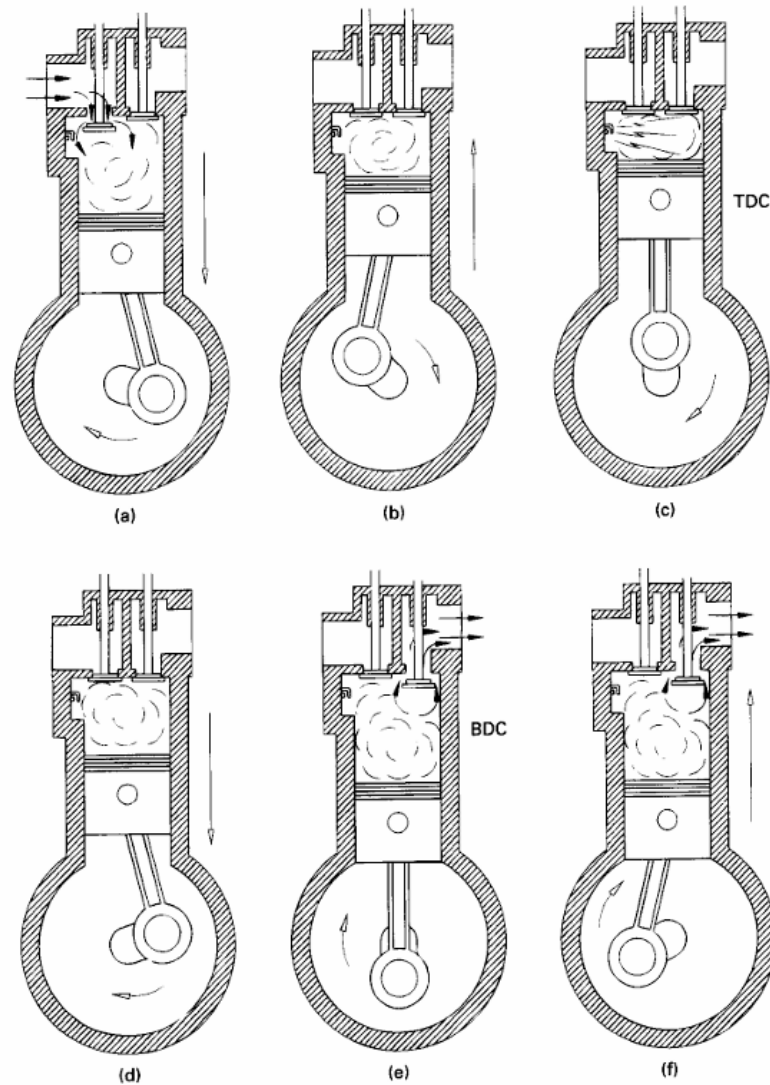
Curso de expansão: Quando as válvulas estão fechadas e a alta pressão criada no interior da câmara, o pistão se desloca do ponto morto superior para o ponto morto inferior.

Descompressão rápida: Ao fim do curso de expansão a válvula de escape se abre e ocorre a descompressão rápida, pois se tem um gradiente de pressão com relação à pressão atmosférica devido a abertura da válvula de escape.

Curso de exaustão: instante no qual os gases residuais da combustão são expelidos para fora da câmara de combustão.

Para uma melhor ilustração, pode-se observar a representação de cada um dos cursos e eventos descritos na Figura 3, na ordem descrita anteriormente.

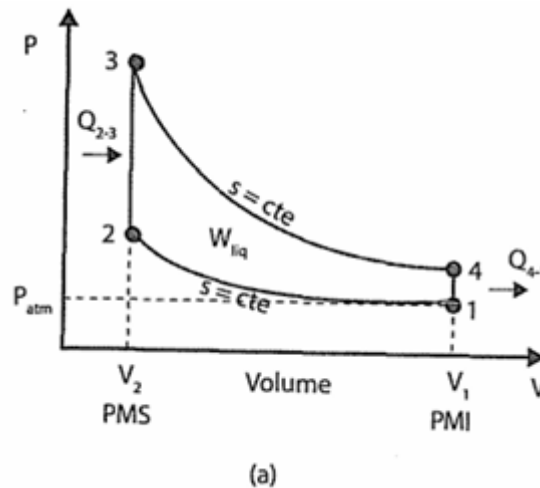
Figura 3 – Funcionamento e eventos em um motor de 4 cursos



Fonte: PULKRABEK (2004).

Na Figura 4, é apresentado o diagrama P-V do funcionamento ideal do ciclo Otto.

Figura 4 – Diagrama P-V motor ciclo Otto ideal



Fonte: BRUNETTI, 2012.

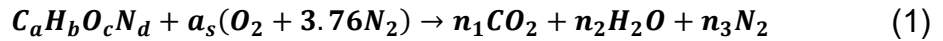
1.3 Conceitos e ferramentas básicas de Calibração

1.3.1 Controle de Ar

Para controlar a quantidade de ar que está sendo admitida por um motor, existem alguns tipos de dispositivos que são utilizados, podendo ser estes, tanto componentes mecânicos (corpo de borboleta acionado por cabo) quanto componentes eletrônicos (corpo de borboleta eletrônico, que é o mais comum na indústria de calibração).

Ao controlar a quantidade de ar que entra no motor através da abertura da borboleta, pode-se então começar a trabalhar com outros parâmetros de calibração, sendo esses: Massa de combustível injetada, avanço de ignição aplicado e controladores como o de malha fechada da sonda ou de rotação de marcha lenta.

Quando se trata do assunto de controle de ar, um conceito que possui relação direta é o de controle da fração combustível – ar, que de acordo com Ferguson (2001), dá-se inicialmente pelo desenvolvimento de uma equação genérica de combustão, supondo uma relação estequiométrica, como a equação (1):



Do desenvolvimento da equação (1), considerando seu balanceamento químico e após algumas manipulações, obtém-se a equação (2) para a relação ar-combustível:

$$AF_s = \frac{28.85(4.76 a_s)}{AF_{atual} 12.01 a + 1.008 b + 16.00 c + 14.01 d} \quad (2)$$

sendo esse conceito muito importante para a consolidação de outros assuntos que serão abordados ainda no presente trabalho.

1.3.2 Injeção de Combustível

A injeção de combustível é denominada como a quantidade de combustível que um motor de combustão interna demanda para que seja viável o seu funcionamento. Na indústria automotiva, a quantidade de combustível pode ser utilizada de diversas maneiras a fim de garantir para um motor, além de é claro de seu funcionamento, também um bom desempenho, confiabilidade, durabilidade e uma faixa ótima de trabalho. Esse é um dos principais fatores relacionados a calibração de motores atuais, que é controlado eletronicamente.

1.3.3 Avanço de Ignição

O avanço de ignição segundo Ferguson (2001) e Heywood (1988) é definido pelo instante no qual em motores SI (*Spark Ignition*) se tem a centelha que é gerada pela vela de ignição através da bobina. Uma vez que o avanço de ignição é gerado, é possível relacionar a maneira que a fração de massa de ar-combustível queimada (x_b) se comporta em função do ângulo do virabrequim, sendo expressa pela equação (3):

$$x_b(\theta) = \frac{1}{2} \left[1 - \cos \left(\frac{\pi(\theta - \theta_s)}{\theta_d} \right) \right] \quad (3)$$

Onde:

θ : ângulo de manivela;

θ_s : ângulo de manivela de início da liberação de energia;

θ_d : ângulo de manivela de duração da liberação de energia.

Para que seja possível extrair a melhor performance e confiabilidade dos motores, existem algumas estratégias que habitualmente são utilizadas através do avanço de ignição, como por exemplo: obter valores otimizados de torque e potência, proteção de componentes através de sensores que corrijam esse parâmetro (*knock sensor*), realizar o aquecimento de componentes (emprego de catalisadores quando se pensa em âmbito de emissões de poluentes), entre outras ações no âmbito da calibração de motores.

1.3.4 Sensor de Oxigênio (Sonda *lambda* – λ)

Antes de abordar a respeito do sensor de oxigênio, é importante estabelecer dois conceitos: A relação ar-combustível (*air fuel ratio*): (Razão Ar-Combustível estequiométrico sobre a razão ar-combustível atual) e a relação de equivalência (*fuel air ratio*): (razão combustível-ar atual sobre a razão combustível-ar estequiométrica) para assim, compreender a finalidade do sensor. Na sequência, têm-se a definição desses parâmetros, equações (3) e (4), respectivamente, segundo Banish (2007), Heywood (1988), Ferguson (2001):

$$\lambda = \frac{AF_{\text{estequiométrico}}}{AF_{\text{atual}}} = \frac{1}{\phi} \quad (3)$$

$$\phi = \frac{FA_{\text{atual}}}{FA_{\text{estequiométrico}}} = \frac{1}{\lambda} \quad (4)$$

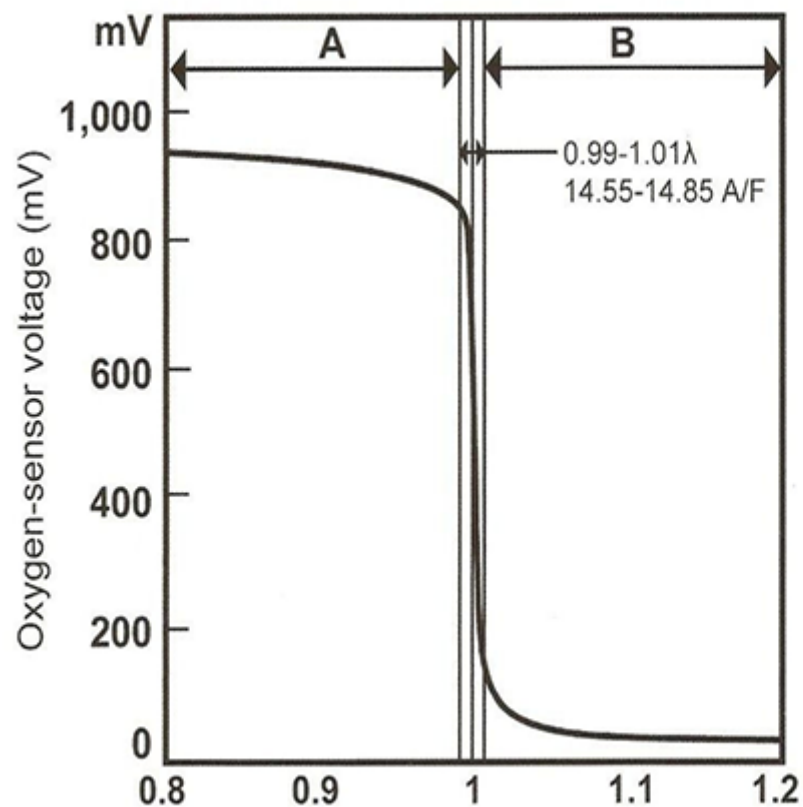
O sensor de oxigênio é um dos componentes essenciais quando se trata do âmbito de calibração de motores para motores de ignição por centelha (independentemente de seu ciclo de trabalho), através deste é possível avaliar como a reação da combustão está ocorrendo dentro da câmara de combustão e, principalmente, como a mistura de ar e combustível está sendo formada. Por meio desse sensor é possível medir e analisar a quantidade de oxigênio residual da reação de combustão.

Segundo Blair (1999) o sensor de *lambda* é utilizado para fazer a medição da relação ar-combustível, que possui relação com a relação combustível-ar, como já abordado.

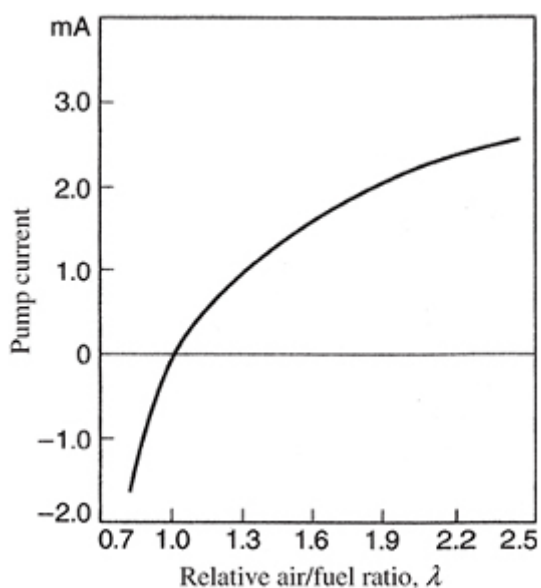
Atualmente, existem dois (2) tipos de sensores que são mais utilizados: O sensor *narrowband*, que tem seu funcionamento dado por pulsos, que

indicam se a mistura está rica ou pobre através de sua leitura de tensão e; o sensor *wideband*, que realiza a medição através de valores mais contínuos com uma relação entre a corrente que o sensor experimenta na leitura e o valor de λ medido. Nas Figuras 5 e 6, respectivamente, compara-se o funcionamento desses dois tipos de sensores descritos.

Figura 5 – Sensor *Narrowband*



Fonte: BANISH, 2007.

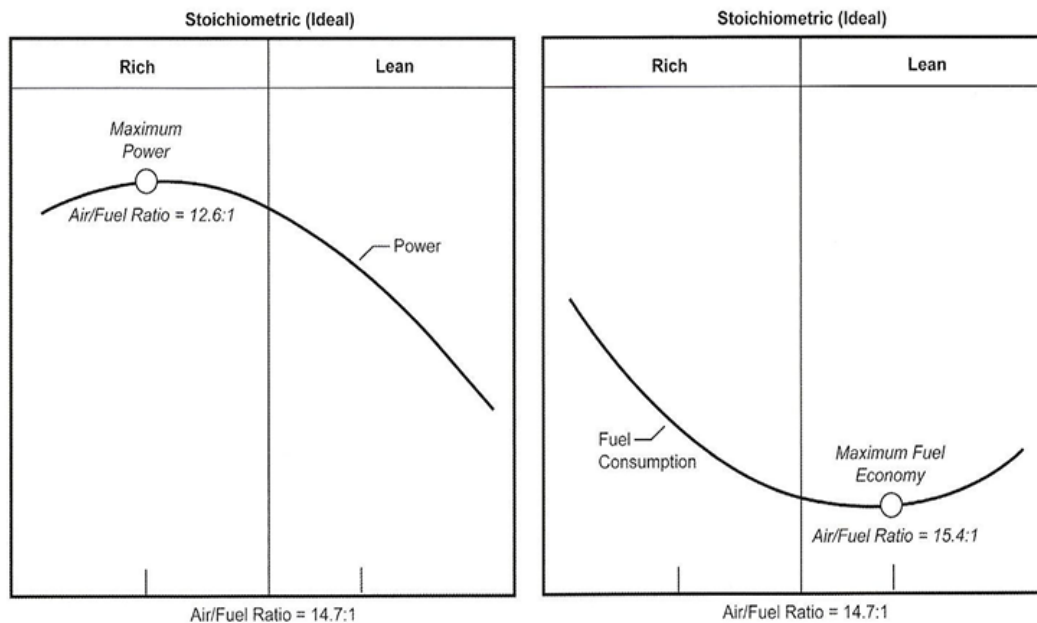
Figura 6 – Sensor *Wideband*

Fonte: HEYWOOD, 1988.

Através do sensor *lambda* do tipo *wideband*, que afere a quantidade de oxigênio dos gases de saída do escape após o processo de combustão, é possível também analisar e determinar o melhor compromisso entre a questão de potência e performance do motor em relação a economia de combustível.

Quando se trata de misturas ar-combustível, que podem ser obtidas através do equacionamento já mencionado no item 1.3.1 do presente trabalho, na combustão, é possível trabalhar com 3 tipos distintos de misturas: A mistura rica (a qual têm valores medidos de $\lambda < 1$), a mistura pobre (a qual têm valores medidos de $\lambda > 1$) e, por fim, a mistura estequiométrica (a qual têm valores medidos de $\lambda = 1$).

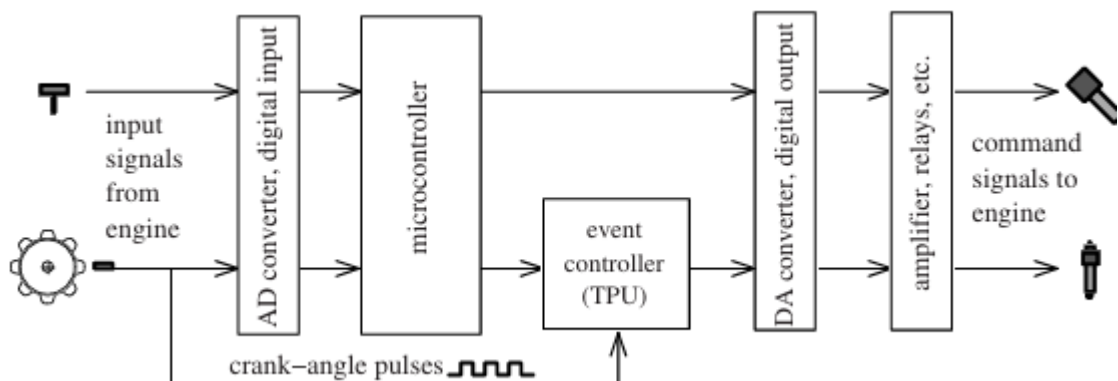
O ideal é que se trabalhe com a mistura estequiométrica da relação de combustão, no entanto a mesma não define benefícios o tempo todo quando se pensa na vida útil de um motor, como também na questão do consumo de combustível. Na sequência é apresentada uma análise de Banish (2007), considerando as misturas de ar-combustível possíveis de ocorrer em um motor; no exemplo, supõe-se um motor com gasolina quando se trata dos aspectos de potência e consumo de combustível, como ilustrado a Figura 7.

Figura 7 – Relação ar-combustível com potência e economia

Fonte: BANISH, 2007.

1.3.5 ECU (Eletronic Control Unit)

A unidade central eletrônica é o componente responsável por comandar e controlar todos os parâmetros que estão relacionados com o funcionamento de um motor, segundo Guzzela e Onder (2010), sendo que essa possui microcontroladores e unidades de processamento que sincronizam a questão dos dados e comandos em um motor a combustão, além de também possuir um *software* para acompanhamento dos dados em tempo real. Na Figura 8, é mostrado de maneira geral, o funcionamento de uma ECU.

Figura 8 – Estrutura interna de uma ECU

Fonte: GUZELLA & ONDER (2010).

1.3.6 Sensor MAP (*Manifold Air Pressure*)

É um sensor utilizado de maneira a averiguar a pressão absoluta que está presente em um coletor de admissão; esse dado, é de vital importância para análises relacionadas a questão de como o motor está se comportando e se pode através dele controlar fatores como a quantidade de ar que é admitido pelo motor ou até mesmo a quantidade de combustível que é aplicada pela injeção eletrônica para o funcionamento do motor. Segundo Heywood (1998), em motores que não possibilita a medição de fluxo de ar de admissão, é muito comum utilizar o sensor MAP, para maior interação com a ECU.

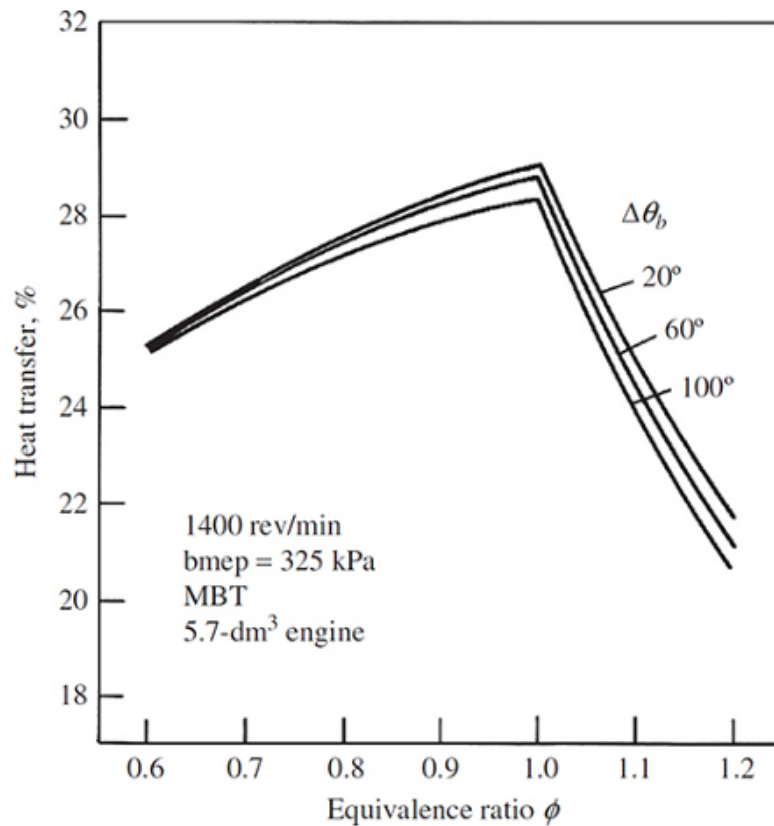
1.3.7 Sensor TPS (*Throttle position sensor*)

É um sensor utilizado para realizar a leitura da posição do corpo de borboleta do motor, através do mesmo é possível realizar muitas análises de dados com tópicos como monitoramento do piloto ou motorista, ajustes de calibração de motores (quantidade de combustível em uma partida, ajuste de calibrações de transiente, corte de injeção, entre outros).

1.3.8 Transferência de calor em um motor com relação a mistura

A transferência de calor de um motor de combustão é um dos pontos de extrema atenção quando se pensa na calibração de motores, sendo que o foco da calibração deve sempre ser bem definida quanto a aplicação para cada motor que está sendo preparado; no caso do formula SAE, em razão de um pouco mais de confiabilidade para o sistema de arrefecimento que é montado, opta-se por utilizar misturas levemente mais ricas. De acordo com o gráfico apresentado na Figura 9, devido a Heywood (1988), quanto mais incrementada a razão de equivalência Φ em uma condição controlada e constante, menor é a transferência de calor e, conseqüente menor, é o calor liberado pelo motor. Isso, considerando os diferentes valores de ângulo rápido de queima ($\Delta\theta_b$), que é o intervalo entre o fim do desenvolvimento da chama de combustão e o fim do processo de propagação da chama.

Figura 9 – Transferência de calor em função da razão de equivalência



Fonte: HEYWOOD, 1988.

1.3.9 Torque e Potência

O torque é um conceito segundo Pulkrabek (2004), que está relacionado como um bom indicador da capacidade de um motor realizar trabalho, para um motor de 4 cursos; já a potência, é avaliada através da variação de torque em um determinado período de tempo. Geralmente é utilizado para a obtenção do valor dessas grandezas, testes através de um dinamômetro, em que é possível a obtenção do torque pela equação (5), segundo Blair (1999) como:

$$Z_b = F \times L \quad (5)$$

onde;

Z_b : Valor de Torque obtido pelo dinamômetro;

F : Reação aplicada ao centro do dinamômetro;

L : Raio de aplicação da força.

E, pela equação (6), a potência, definida como:

$$\dot{W}_b = \frac{2\pi Z_b \text{rpm}}{30} \quad (4)$$

onde;

$\dot{W}_b$: Potência obtida;

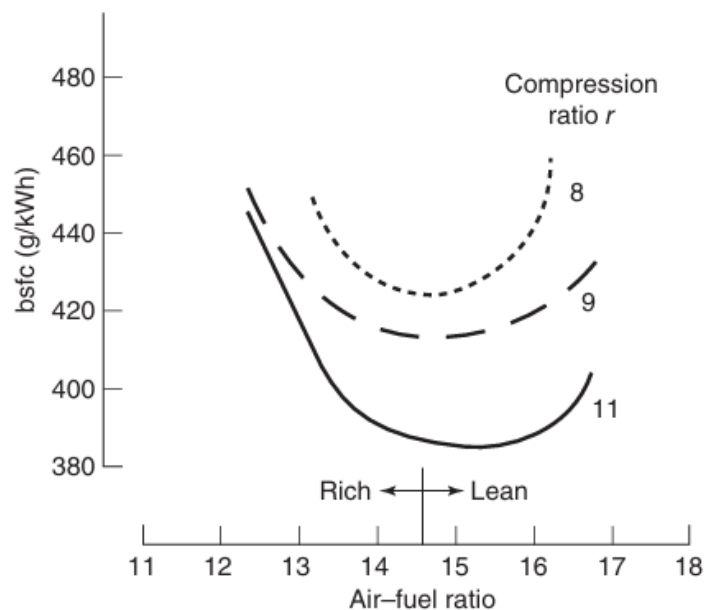
Z_b : Valor do torque obtido;

rpm : Rotações por minuto do motor.

1.3.10 Consumo específico de combustível

A questão da economia e eficiência de combustível é muito relacionada com a relação ar-combustível para diferentes razões de compressão r (que é a divisão entre o volume total que é possível ter em um motor sobre o volume mínimo do motor quando o pistão se encontra no ponto morto superior), que é utilizada pelo motor em seu funcionamento de acordo com a situação de trabalho (geralmente relacionado com a carga e a rotação do motor) quando se está em condições estabilizadas, como pode ser observado na Figura 10.

Figura 10 – relação consumo específico e *air fuel ratio*

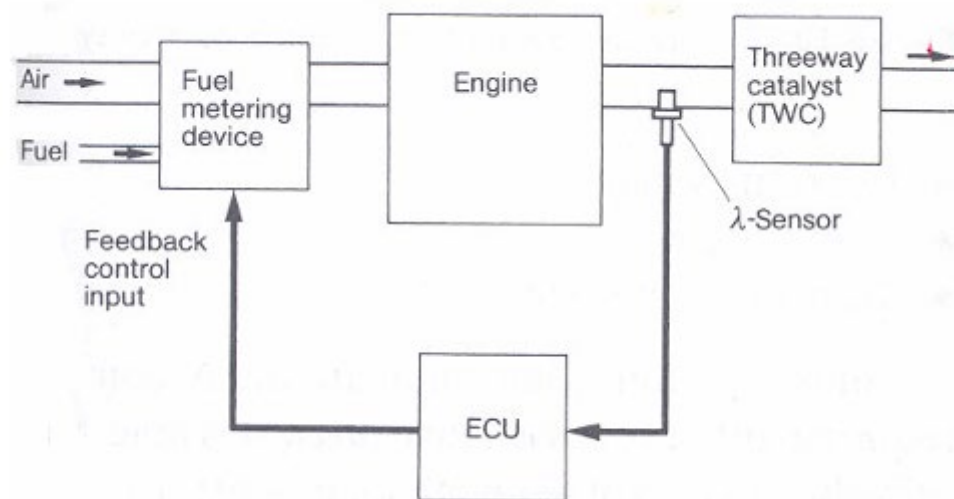


Fonte: FERGUSON, 2001.

1.3.11 Controladores de malha fechada em motores

Os sistemas mecânicos cada vez mais necessitam de um refino maior em seu funcionamento, sobretudo, quando se trata do funcionamento de um motor, sendo um dos fatores mais importantes o controle de malha fechada (podendo ser muita das vezes um controlador PID). Seu funcionamento pode ser explicado pelo esquema mostrado na Figura 11.

Figura 11 – Esquema controle malha fechada sonda



Fonte: ARAS, 2004.

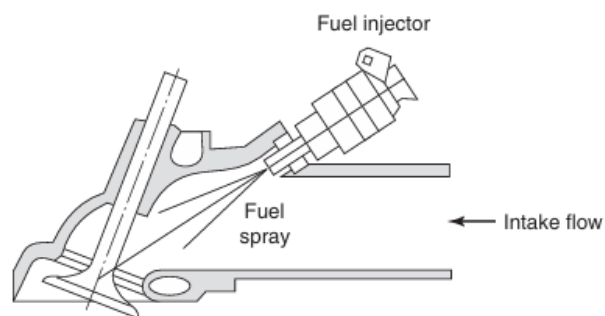
O controlador de malha fechada para a sonda *lambda*, é um fator de suma importância para o funcionamento de um motor, segundo Heywood (1988) e Pulkrabek (2004), pois esse controlador é utilizado através da ECU para controlar a quantidade de combustível injetada no motor, o que garante melhor performance e também uma faixa de trabalho que é considerada ideal, quando se pensa por exemplo, no âmbito de emissões de poluentes.

1.3.12 Motores PFI (*Port fuel injection*) e GDI (*Gasoline direct injection*)

Os motores denominados PFI (*port fuel injection*), segundo Heywood (1988) e Ferguson (2001), são aqueles que possuem o sistema de bicos injetores próximos a cada uma das válvulas de admissão por onde é feita a injeção de combustível, que ao estarem aquecidas promovem uma melhor

vaporização do mesmo. Esses motores possuem algumas estratégias, principalmente, com relação a correções de aplicação de combustível em regiões denominadas como transiente (correção por aceleração que será um dos temas abordados), para compensar perdas advindas do corpo de borboleta e coletor de admissão, que podem variar de acordo com a forma que o escoamento no interior desses componentes é idealizado e otimizado na concepção do projeto. Essas correções que por ser bem calibradas podem gerar grandes benefícios quando se trata da questão de durabilidade e desempenho de um motor SI (*Injection system*). Na figura 12 é apresentado um esquema de um motor PFI.

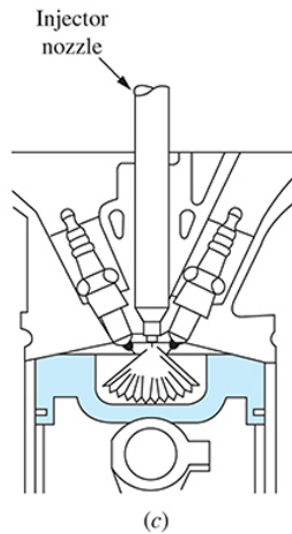
Figura 12 – Esquema injeção motor PFI



Fonte: FERGUSON, 2001.

Já os motores denominados DI (*Direct injection*) são os quais possui a injeção de combustível diretamente nos cilindros, o que pode em muitos aspectos auxiliar na questão de desempenho do motor, em razão de possuir um melhor controle do combustível e de reduzir possíveis perdas advindas de influências do corpo da borboleta, como ocorre nos motores PFI. Na Figura 13 é mostrado o esquema de um motor DI.

Figura 13 – Esquema injeção motor DI



Fonte: HEYWOOD, 1988.

1.3.13 Calibração de Motores

Segundo Guzzela & Onder, a calibração de motores é definida como a ação de ajustar mapas e funções do sistema de controle eletrônico de um motor com base em testes experimentais e modelos, de modo que seja possível obter um determinado comportamento esperado de um motor a combustão. Fato que segue ao argumentado por Heywood (1988) e com Bosch (2004), que ao se controlar parâmetros como avanço de ignição, razão ar combustível e alguns outros parâmetros, torna-se um processo, que quando ajustados, visam melhorar o desempenho, como também quando se trata da indústria automotiva atual, melhorar dirigibilidade e emissões.

2 Objetivos

São objetivos do presente trabalho:

- Analisar e estudar algumas das estratégias de calibração de motores presentes na ECU utilizada pela equipe Fênix Racing Formula SAE (fato esse que vem ocorrendo ao longo dos anos através dos membros da área de *powertrain*);
- Trabalhar com aquisição de dados do motor de combustão interna;
- Aplicar conceitos teóricos que envolva o funcionamento de um motor de combustão interna para que em trabalhos futuros seja possível possuir um nível de informação maior para a calibração do motor da equipe, independente de qual seja;
- E, explorar pontos mais específicos, visando melhorar o desempenho do veículo.

3 Metodologia

A metodologia utilizada foi a teórico – experimental, pela qual se realizou estudos e pesquisas na literatura para que fosse possível a obtenção de conceitos e conhecimentos relacionados ao tema do trabalho em questão, de maneira que com um entendimento técnico mais robusto fosse possível realizar a preparação e viabilização dos testes propostos. Por fim com os testes já realizados foram realizadas análises a respeito das estratégias exploradas, obtendo conclusões e gerando recomendações para futuros trabalhos.

3.1 Características do motor utilizado

Para a realização dos testes, utilizou-se o conjunto de componentes do *powertrain* da equipe Fênix Racing Formula SAE (motor de CB600F que se enquadra nos parâmetros da SAE INTERNATIONAL, 2024), os quais foram em sua maioria idealizados e utilizados de forma a garantir o melhor funcionamento possível do sistema para o veículo da equipe. Na Tabela 1, têm-se os componentes necessários para a realização dos testes do presente trabalho.

Tabela 1 – Configuração utilizada para os testes

Componente	Função
Motor CB600F e periféricos projetados	Garantir o bom funcionamento do motor de forma que fosse possível a realização dos testes planejados para o presente trabalho
<i>Megasquirt MS3</i>	Injeção eletrônica pela qual foram elaboradas propostas de calibração a serem testadas
<i>Notebook Windows 10</i>	Ferramenta utilizada como interface para fazer update das propostas para a injeção eletrônica e realizar aquisição dos dados

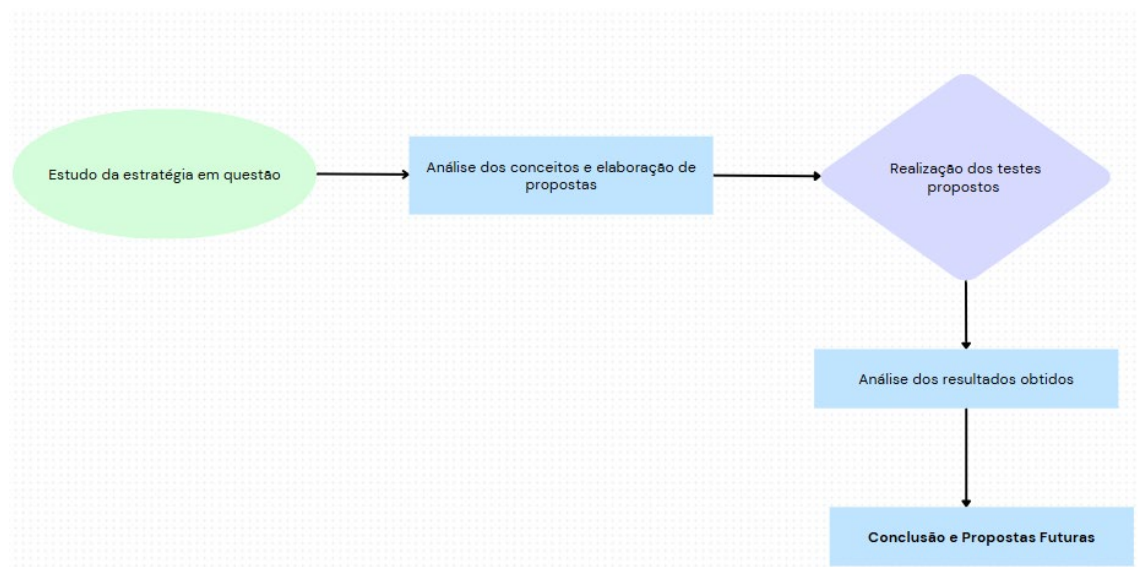
<i>Tunerstudio 3.2.05</i>	<i>Software</i> específico utilizado para a aquisição dos dados
<i>MegaLogViwer 4.5.21</i>	<i>Software</i> específico utilizado para a visualização dos dados obtidos e pós processamento dos mesmos

Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2 Condução dos testes realizados

Para a realização dos testes envolvidos no presente trabalho, uma forma de representar de maneira mais simples é através do fluxograma de trabalho mostrado na Figura 14, onde se tem os passos que foram seguidos para que o presente trabalho fosse viabilizado.

Figura 14 – Fluxograma de trabalho



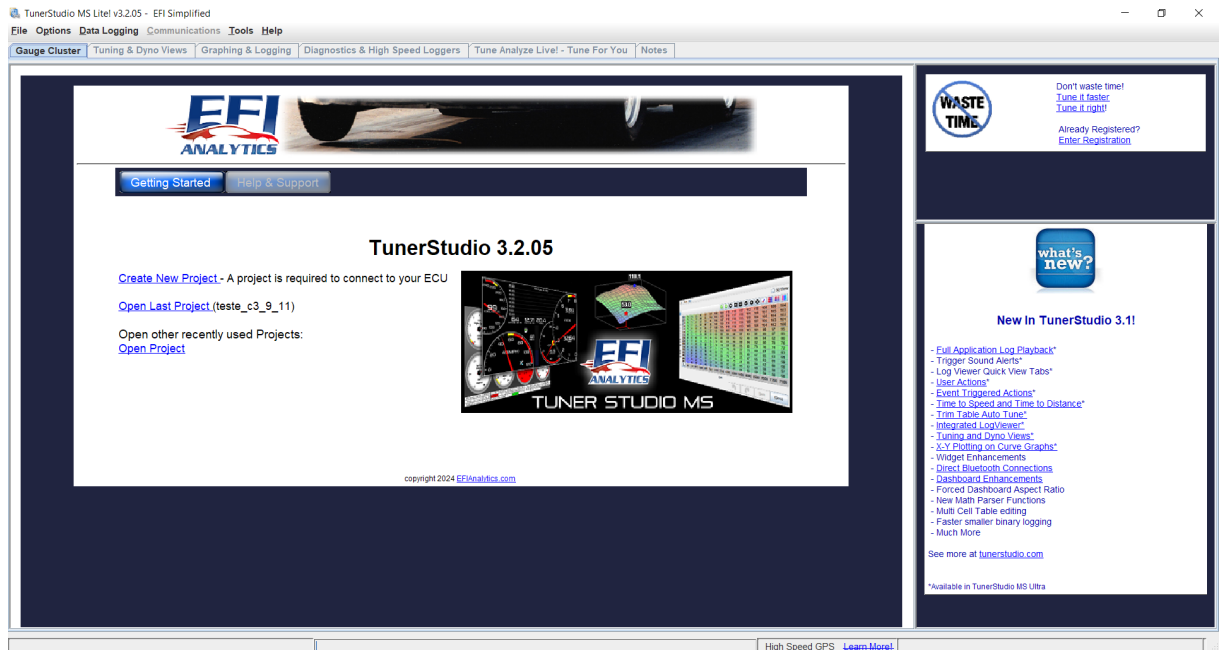
Fonte: Elaborado pelo autor.

3.3 Softwares e Ferramentas utilizados

Para a realização dos testes foram utilizados como ferramentas principais: A injeção eletrônica da Equipe (uma *Megasquirt MS3x*), o seu *software Tunerstudio* para a realização das propostas de estudo, como das estratégias e aquisição dos dados e, por fim, para que fosse possível analisar e pós processar os dados, utilizou-se o *software MegaLogViwer*, o qual possibilita a abertura dos arquivos gerados pela

injeção eletrônica, o que torna possível com o auxílio dos membros da equipe a realização dos testes para o presente trabalho. Na Figura 15, tem-se a interface inicial do *Tunerstudio* e na Figura 16, a interface do *MegaLogViwer*.

Figura 15 – Interface *Tunerstudio*



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 16 – Interface *MegaLogViwer*



Fonte: Elaborado pelo autor.

4 Análise e Discussão dos Resultados

Nessa seção do trabalho são apresentados, discutidas as estratégias utilizadas pela injeção eletrônica atualmente utilizada pela equipe e analisadas as aquisições para empregar em recomendações futuras para pontos de refino e melhoria da calibração.

4.1 Variáveis de interesse

Na Tabela 2 é mostrado as principais variáveis necessárias para viabilização das análises realizadas, como dos testes propostos para cada uma das calibrações.

Tabela 2 – Variáveis utilizadas para os testes

Variável	Descrição
<i>CLT</i>	Leitura da temperatura de água obtida através do sensor
<i>TPS</i>	Leitura do sensor de medição da abertura do corpo de borboleta
<i>TPS DOT</i>	Variação da leitura do sensor de abertura do corpo da borboleta
<i>MAP</i>	Leitura do sensor de medição de pressão de coletor de admissão
<i>Lambda</i>	Leitura do sensor de oxigênio no sistema de escape
<i>Lambda 1 Error</i>	Erro lido pela ECU entre o target de lambda do controlador e a leitura do sensor
<i>Lambda 1 Target</i>	Target de valor de lambda definido pelo controlador
<i>RPM</i>	Rotação do motor
<i>RPM DOT</i>	Variação dos valores de rotação do motor
<i>Batt V</i>	Tensão da bateria
<i>TPS Accel</i>	Valor de aceleração do TPS
<i>Engine accelerating</i>	Variável que indica que o motor está acelerando
<i>Load</i>	Carga do motor
<i>Engine decelerating</i>	Variável que indica que o motor está em desaceleração

<i>Engine idling</i>	Variável que indica quando o motor se encontra em estado de rotação de marcha lenta
<i>MAP Accel</i>	Variação do MAP em aceleração
<i>SPK: Cold Advance</i>	Avanço de ignição aplicado com motor considerado frio
<i>Lost Sync count</i>	Variável que indica causas de perda de sincronismo
<i>SPK: Fuel cut retard</i>	Retardo de avanço quando se tem a estratégia de fuel cut
<i>SPK: Idle correction advance</i>	Valor de avanço que é aplicado ao utilizar o controle de marcha lenta pela correção de avanço
<i>Fuel: Accel enrich</i>	Correção de combustível utilizada em condições de transiente e aceleração

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2 Correção por aceleração

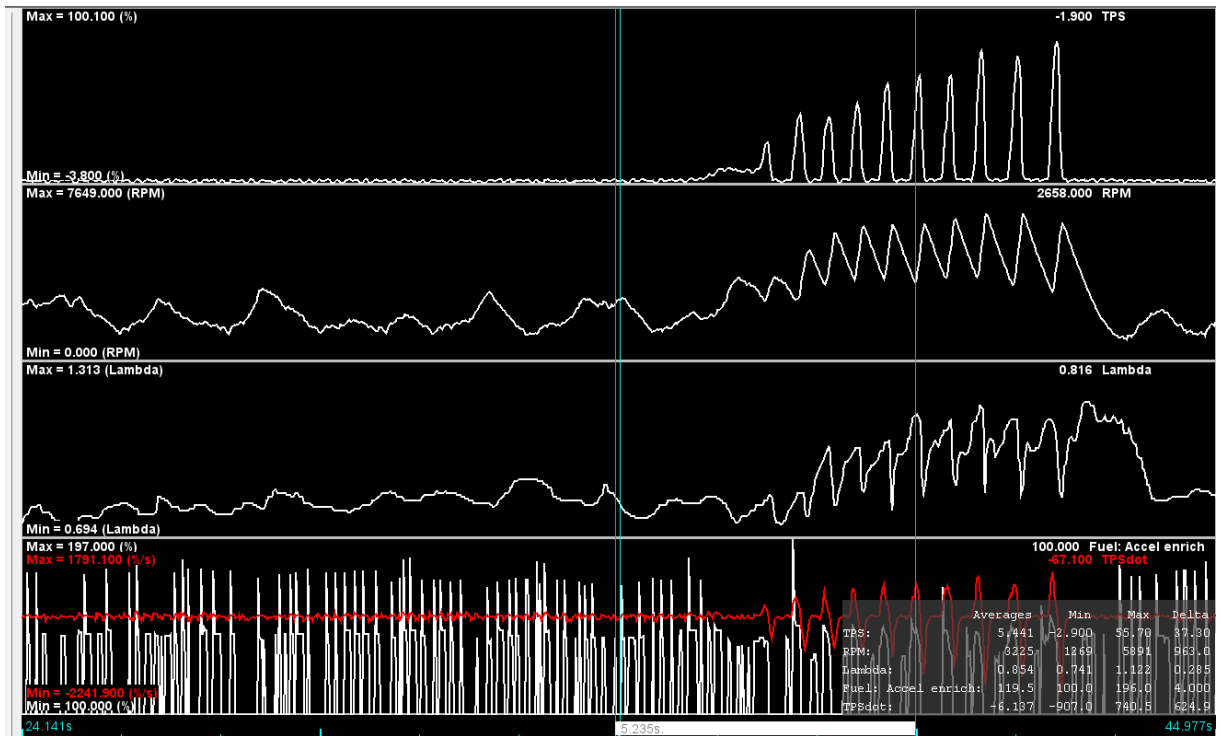
A estratégia em questão consiste no ajuste e na calibração da quantidade de combustível que é injetada pelos bicos injetores quando se realizam variações rápidas de parâmetros como o *MAP* ou o *TPS*. Pelo fato do posicionamento do sensor *MAP* não ser muito ideal no *hardware* utilizado nestes testes, optou-se por trabalhar nas correções de aceleração através da variação de abertura do corpo de borboleta através da leitura da variável *TPSdot*. Na sequência, são abordadas as 2 estratégias possíveis para o motor utilizado no presente trabalho.

4.2.1 Time based Accel

Para essa estratégia é possível calibrar pontos que indicam o pulso de combustível a mais que os injetores irão aplicar de acordo com a variação do sensor de *TPS*; no entanto, os mapas não estão tão discretizados devido à pouca quantidade de pontos disponíveis para a construção da curva, fato esse, que seria contornado caso houvesse mais pontos da curva para calibrar.

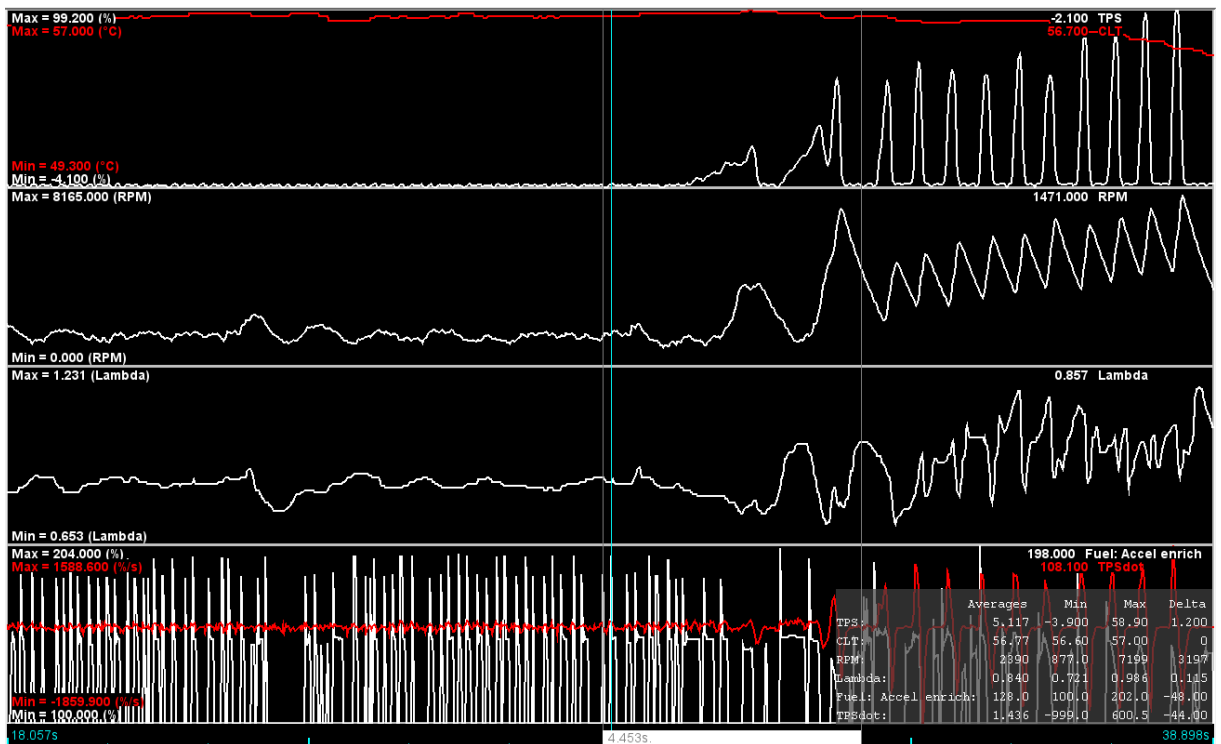
Na sequência as Figuras 17, 18 e 19 mostram os resultados obtidos para as propostas realizadas.

Figura 17 – Proposta 1 de correção por aceleração



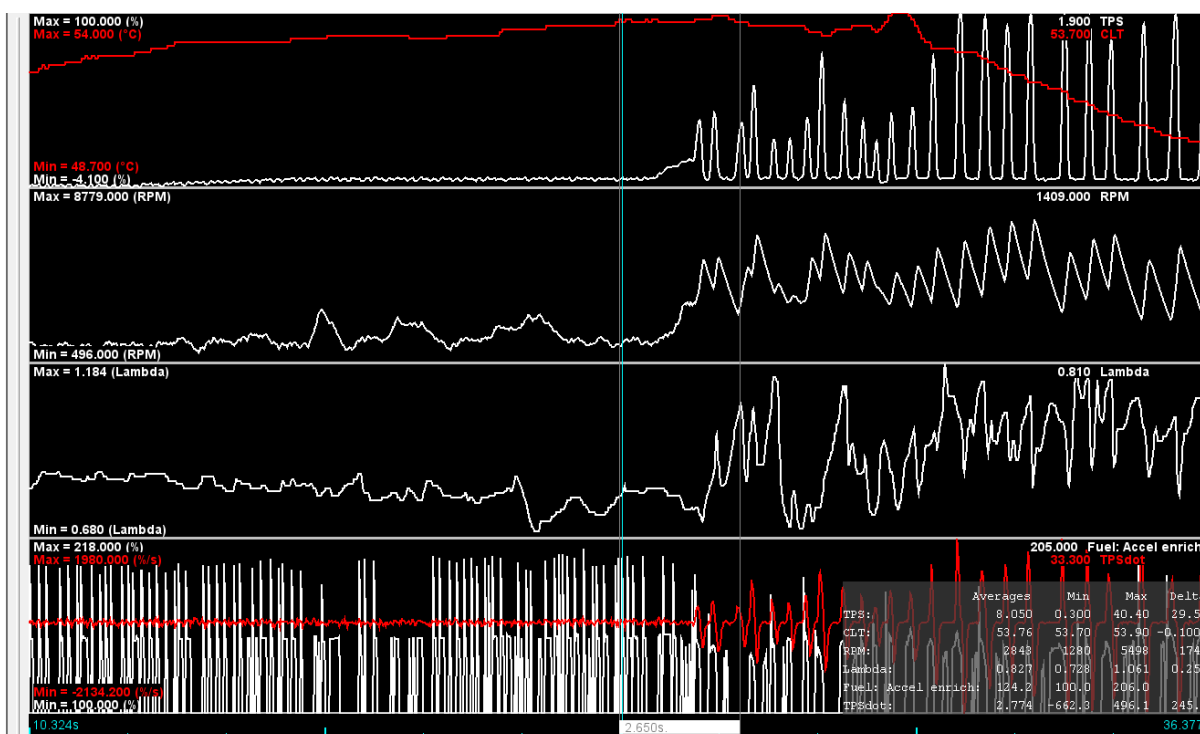
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 18 – Proposta 2 de correção por aceleração



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 19 – Proposta 3 de correção por aceleração



Fonte: Elaborado pelo autor.

Nos resultados obtidos dessas propostas é importante ressaltar que as variáveis analisadas são: O *TPS* (posição de abertura da borboleta), o *CLT* (temperatura de água do motor), *RPM* (Rotação do motor), *Lambda* (Valores de leitura do sensor de oxigênio sonda lambda), *Fuel: accel enrich* (Correção de combustível aplicada por aceleração) e o *TPSdot* (Variação da leitura do sinal do *TPS*).

Percebe-se nesses testes que ao realizar sucessivas acelerações, quanto maior a quantidade de combustível injetada pela correção, melhor a resposta na leitura dos valores de lambda e, obteve-se menores picos pobres, o que demonstra o fato de que a estratégia do *Time based accel* é funcional e tem sua importância, ainda que não se possua tantos pontos, para conseguir uma melhor calibração.

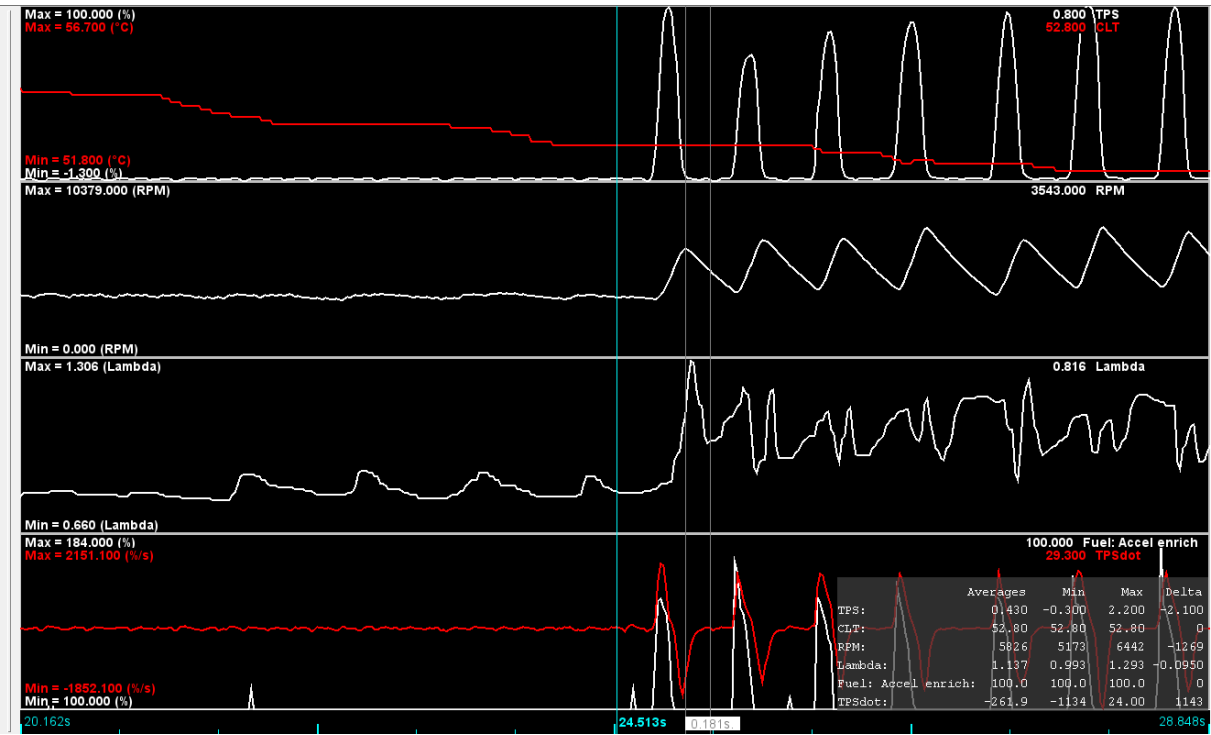
4.2.2 Accel pump enrichment

Nessa estratégia é possível calibrar os pontos que indicam o pulso de combustível a mais que os injetores irão aplicar de acordo com a variação do sensor de *TPS*. No entanto, quando comparado com a estratégia anterior (*Time*

based accel), os mapas podem ser calibrados devido a uma maior quantidade de pontos para a construção da curva, o que a deixa mais suavizada e garante uma melhor resposta do sistema, com o ajuste dessa estratégia de calibração.

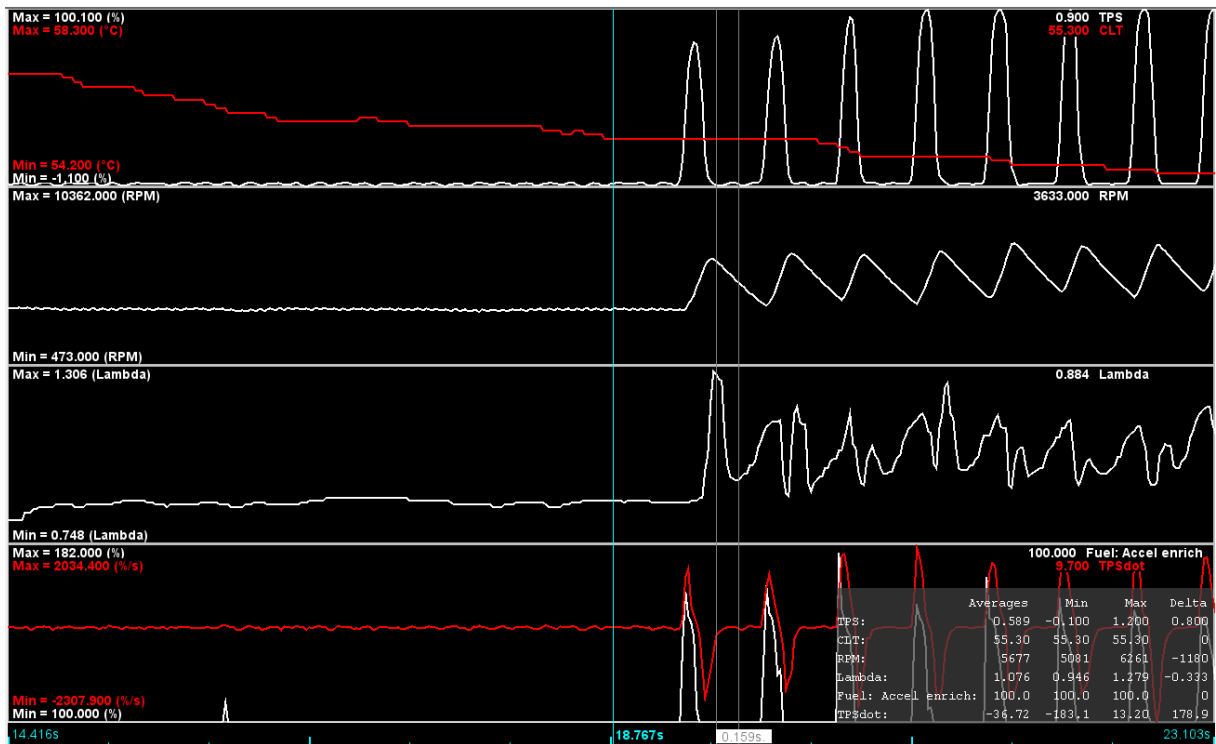
As Figuras 20, 21 e 22 mostram os resultados obtidos para essas propostas realizadas.

Figura 20 – Proposta 1 de correção por aceleração



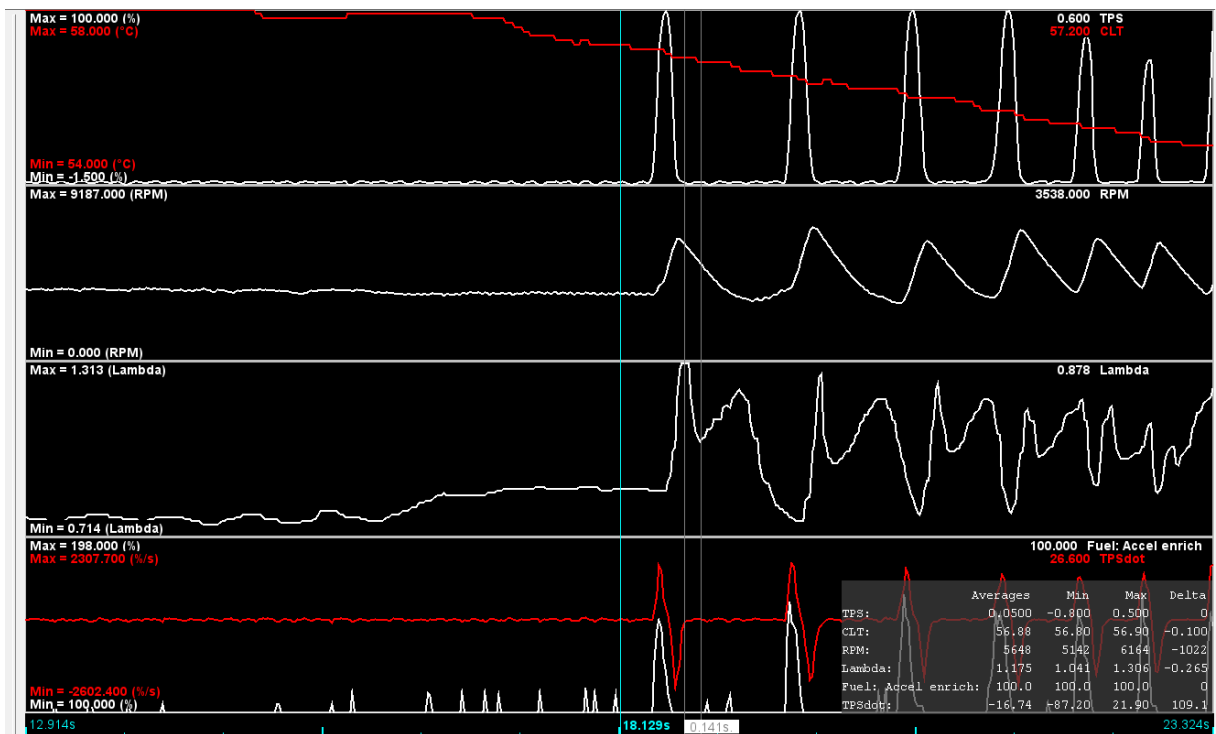
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 21 – Proposta 2 de correção por aceleração



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 22 – Proposta 3 de correção por aceleração



Fonte: Elaborado pelo autor.

Assim, após a realização desses testes, pode-se afirmar que a utilização da estratégia de *Accel pump enrichment*, é a mais viável para a equipe, pelo fato de que além de possuir uma melhor resposta do motor, não gera grandes períodos de mistura pobre dentro deste e que implica em um menor tempo para que se aplique a correção.

Além disso, obtém-se uma melhor discretização da curva de calibração devido à presença de mais pontos, diferindo da estratégia inicial (*Time based accel.*), o que garante uma melhor resposta do sistema para o teste de calibração realizado.

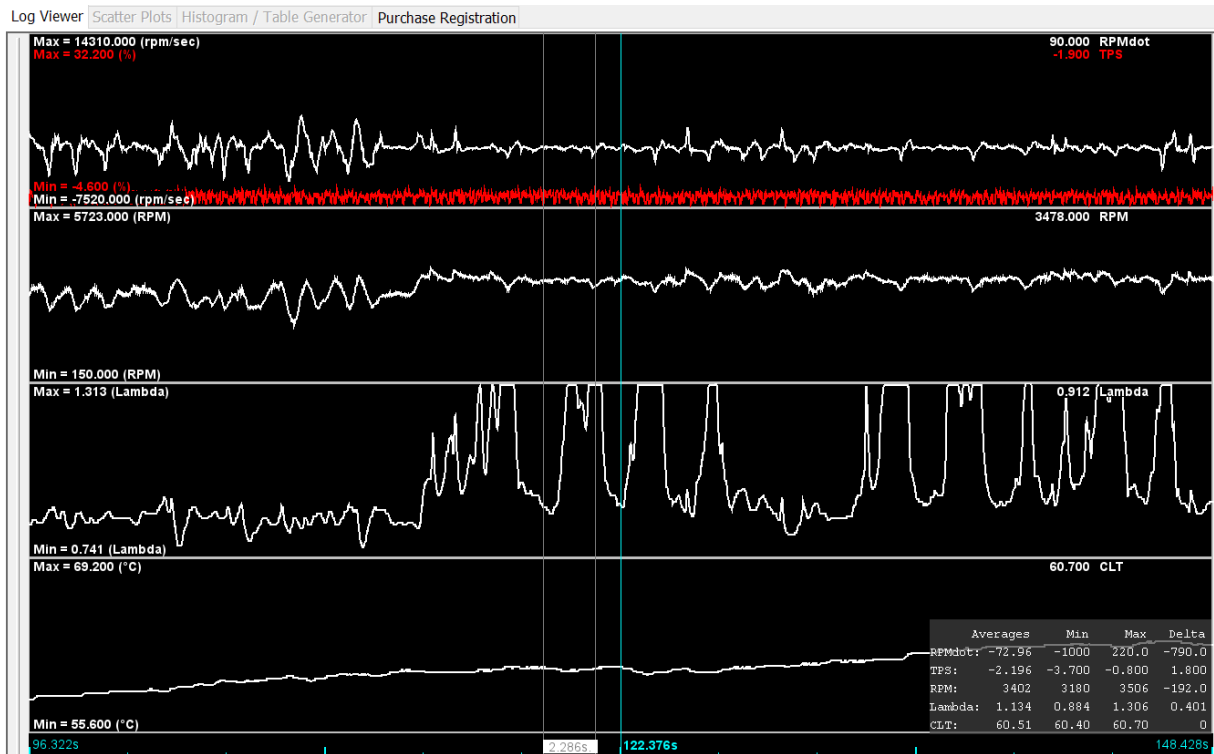
4.3 Controles de marcha lenta

Para essa estratégia de calibração não se possui algo de grande robustez, como por exemplo para o controlador de sonda, o qual é abordado posteriormente; na ECU utilizada existem duas maneiras de realizar o controle da marcha lenta via software e calibração, as quais são:

4.3.1 Combustível

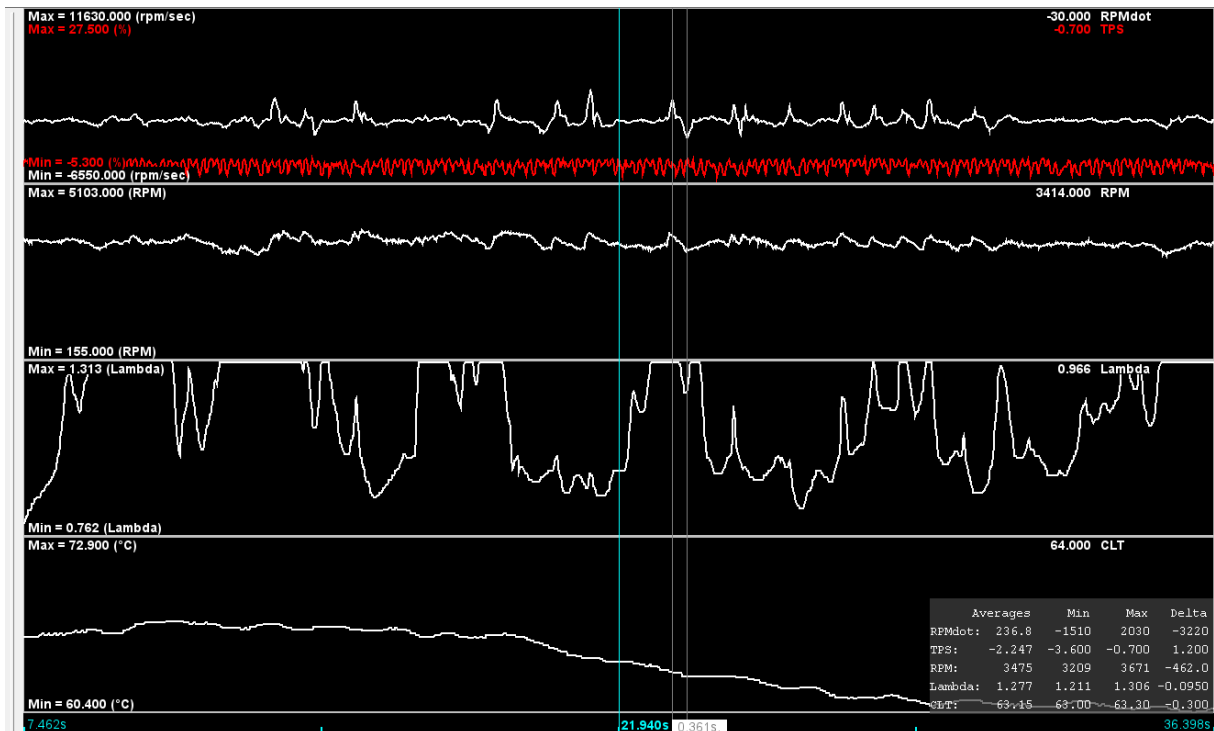
O controle de *idle* por combustível consiste em alterar a quantidade de combustível que é utilizada em função da rotação de trabalho da marcha lenta do motor em questão. Essa estratégia foi calibrada para ativação nos testes em uma temperatura de 60°C medido pelo sensor *CLT*. Dessa forma, alguns testes foram realizados, os quais seus resultados são mostrados, para cada uma das propostas realizadas nas Figuras 23, 24 e 25.

Figura 23 – Proposta 1 de controle de *idle* por combustível



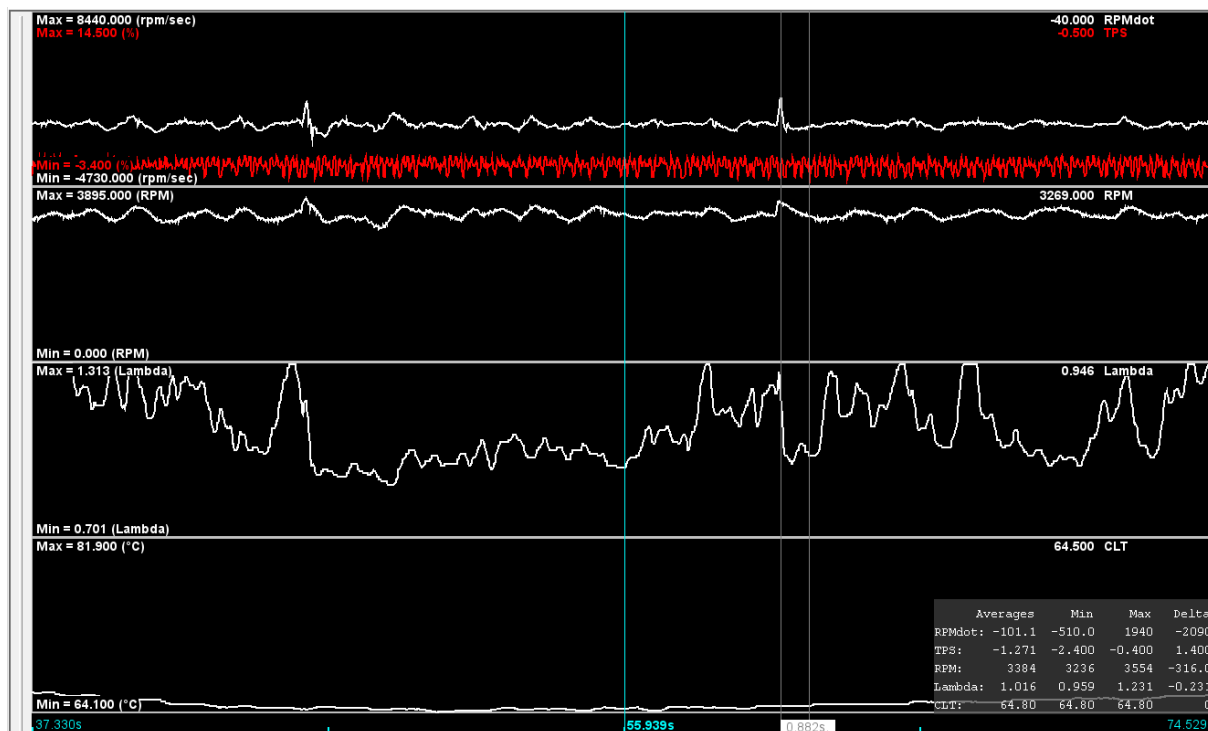
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 24 – Proposta 2 de controle de *idle* por combustível



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 25 – Proposta 3 de controle de *idle* por combustível



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na estratégia do controle de *idle* por combustível, os parâmetros de análise são: A variável *RPMdot* (variação do valor de rotação do motor lido), *RPM* (rotação do motor lida), *Lambda* (valores de leitura do sensor de oxigênio sonda lambda) e a variável *CLT* (temperatura da água do motor).

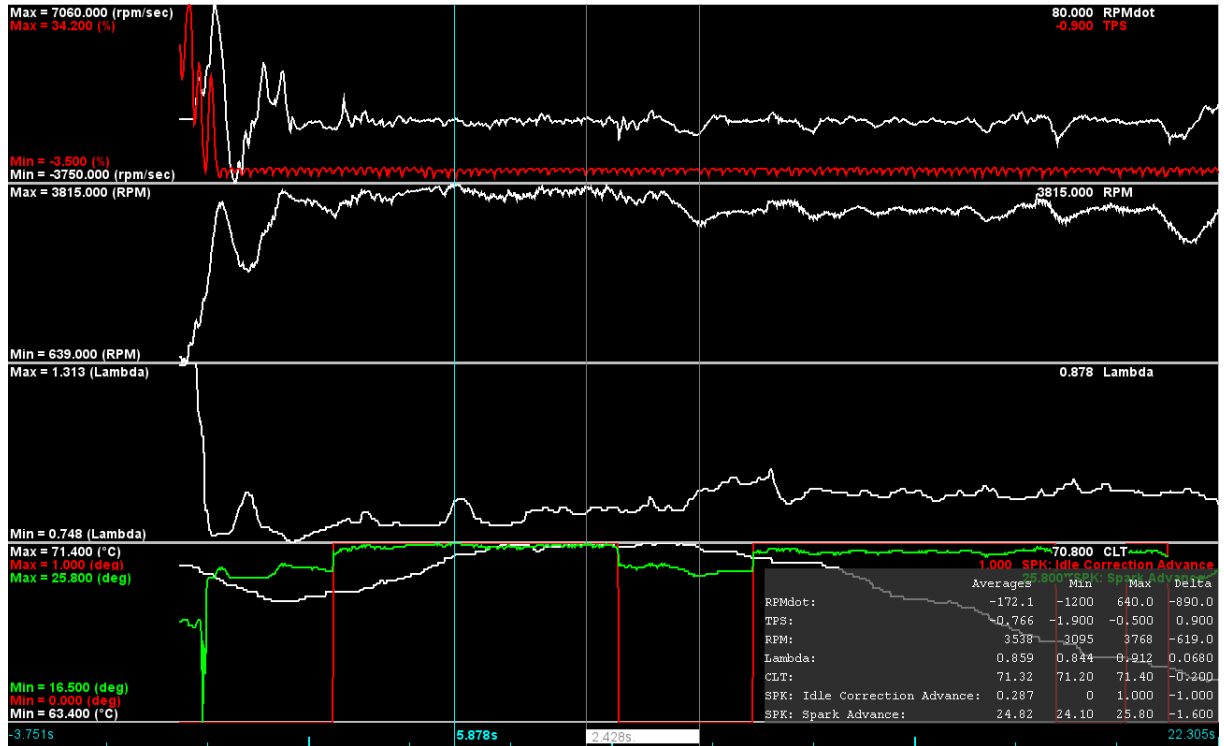
Quando se avalia o comportamento do motor com relação ao seu funcionamento, verifica-se que não houve muito sucesso no requisito da estabilidade da mistura ar-combustível, pois os valores de *Lambda* não apresentam um comportamento considerado ideal para marcha lenta; isto é, o valor ficou variando muito em vez de se manter estável, o que seria o esperado. Esse resultado, portanto, impacta a rotação do motor, causando oscilações bruscas, o que não é interessante quando se considera a vida útil do motor. Daí, opção pelo caminho dessa estratégia não parece a ideal, considerando o bom funcionamento do motor.

4.3.2 Avanço de ignição

O conceito do funcionamento dessa estratégia se baseia em aplicar valores de *offset* absolutos de avanço de ignição de acordo com a variação de

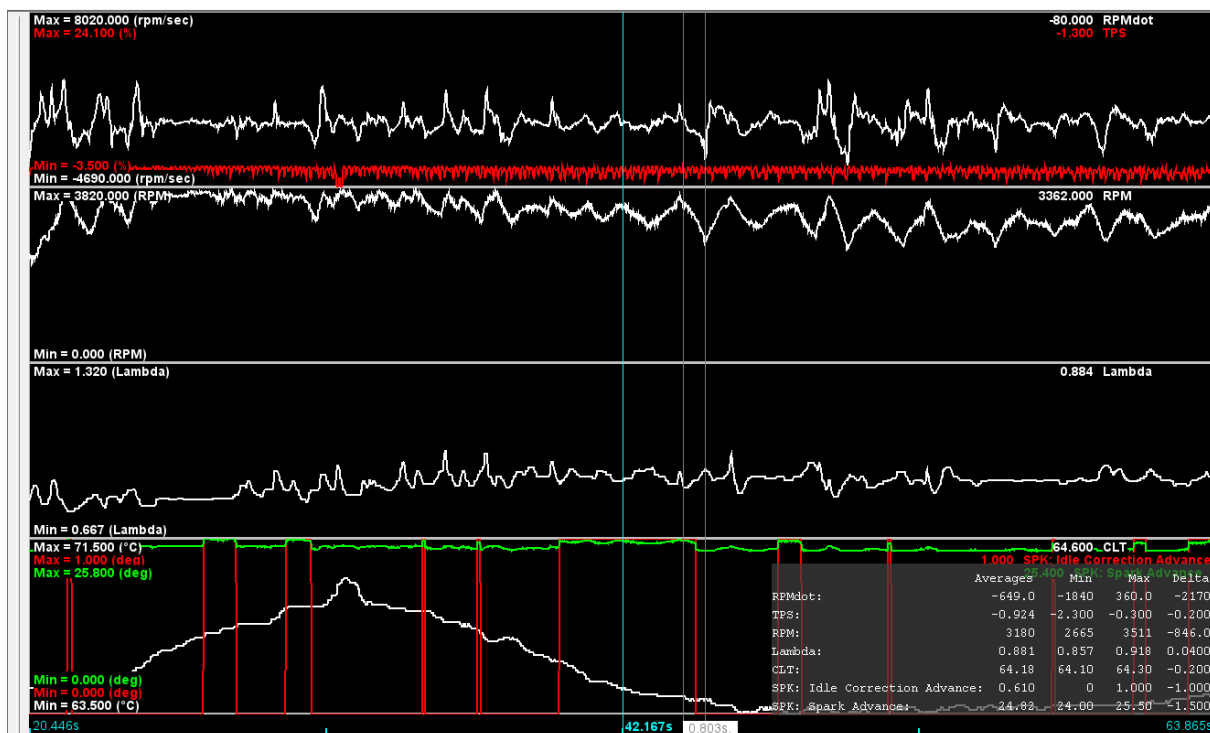
rotação que se tem no motor (controle do *idle* por avanço). Assim, foram realizados alguns testes, os quais têm seus resultados mostrados nas Figuras 26 e 27 para essa estratégia.

Figura 26 – Proposta 1 de controle de *idle* por avanço



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 27 – Proposta 2 de controle de idle por avanço



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na estratégia do controle de *idle* por avanço, os parâmetros de análise são: o *RPMdot*, *RPM*, *Lambda* e *CLT* da mesma forma que na correção por combustível, e além dessas, é também possível analisar as variáveis *Spark advance* (o avanço de ignição aplicado em valor absoluto) e a variável *idle correction advance* (mostra os valores de avanço que estão sendo somados ou subtraídos ao mapa base).

No uso do controle de marcha lenta por avanço é perceptível que a estratégia funciona, pois os valores de *offset* de avanço calibrados são realmente aplicados e a estratégia se mostra muito útil se bem otimizada e ajustada para o motor em questão. Ela é uma forma possível de realizar o ajuste, dada a ausência do *PID* de *idle* (Em trabalhos futuros, buscar caibrar os valores de avanço que auxiliem a estabilizar a eficiência da combustão do motor e diminuir a oscilação da rotação).

Entre as duas propostas, a primeira demonstrou um melhor resultado quando se analisa a variação da rotação, além dessa se manter estável na condição de aplicar o *offset*, o que determina uma melhor estabilização da rotação. Das análises de ambas as estratégias, pode-se afirmar que a melhor

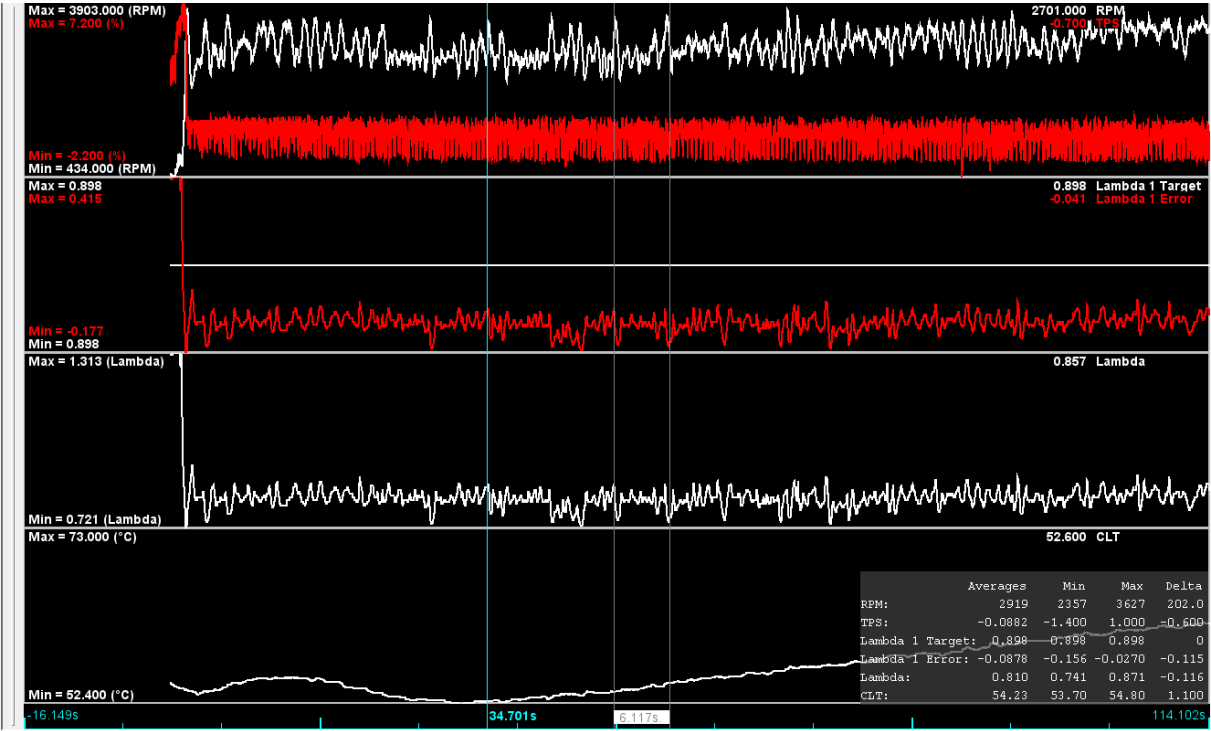
estratégia para se utilizar é aquela através do controle do avanço de ignição, pois se consegue trabalhar mais tranquilamente com valores absolutos de avanço que devem ser somados ou subtraídos ao valor que se tem no mapa base, o que não gera tantos impactos na calibração.

Dessa forma, sendo mais exploratório em relação algum comportamento similar ao caso, seria possível uma estratégia similar àquela do controlador *PID* para o controle de marcha lenta, que é muito utilizada na indústria automotiva.

4.4 Controle de malha fechada (*PID*) para sonda

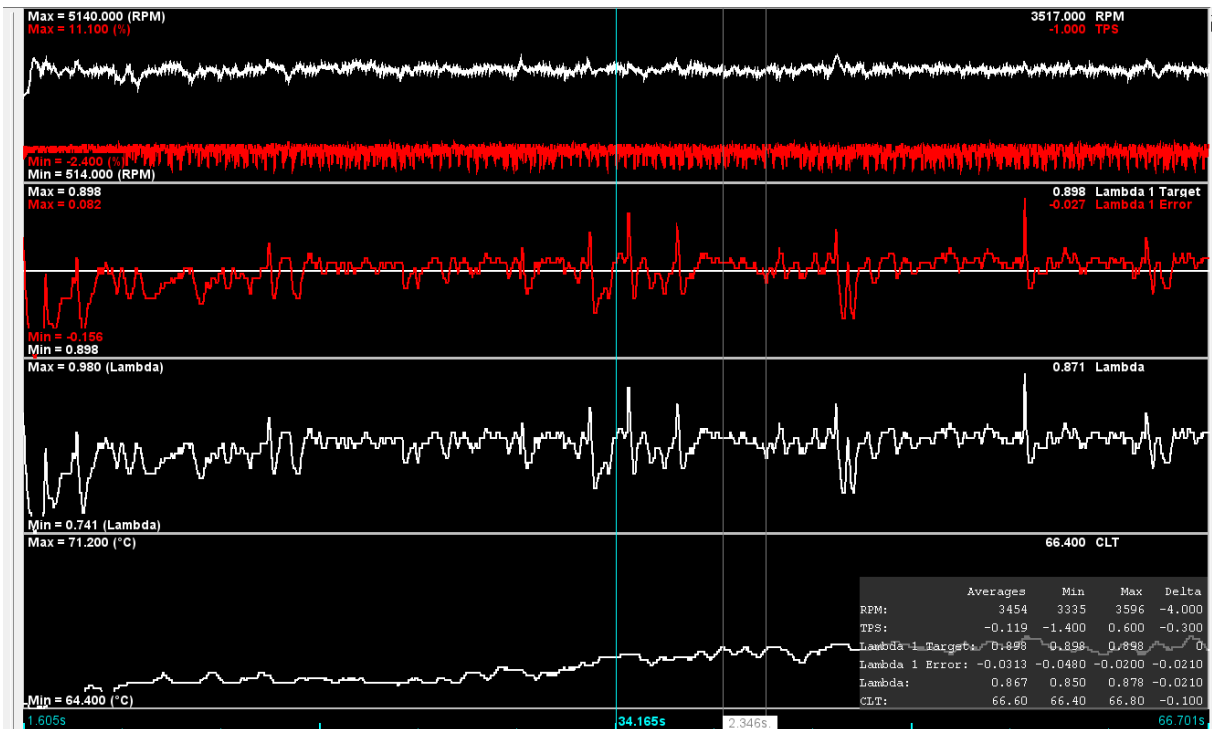
A *Megasquirt* utiliza para o controle da mistura em malha fechada um controlador *PID* para o qual foram realizadas algumas propostas para a verificação do comportamento do controlador; e assim, tentou-se obter um norte de como seria a melhor forma de buscar a otimização da calibração dessa estratégia (foram inicialmente testados os ganhos proporcionais e depois o integral com alguns valores com diferentes *targets* de valor de *Lambda*). São mostrados nas figuras 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33 e 34 os resultados de alguns testes obtidos para as propostas realizadas com um target de valor de lambda de 0.9.

Figura 28 – Controlador ativo sem ganhos aplicados



Fonte: Elaborado pelo autor.

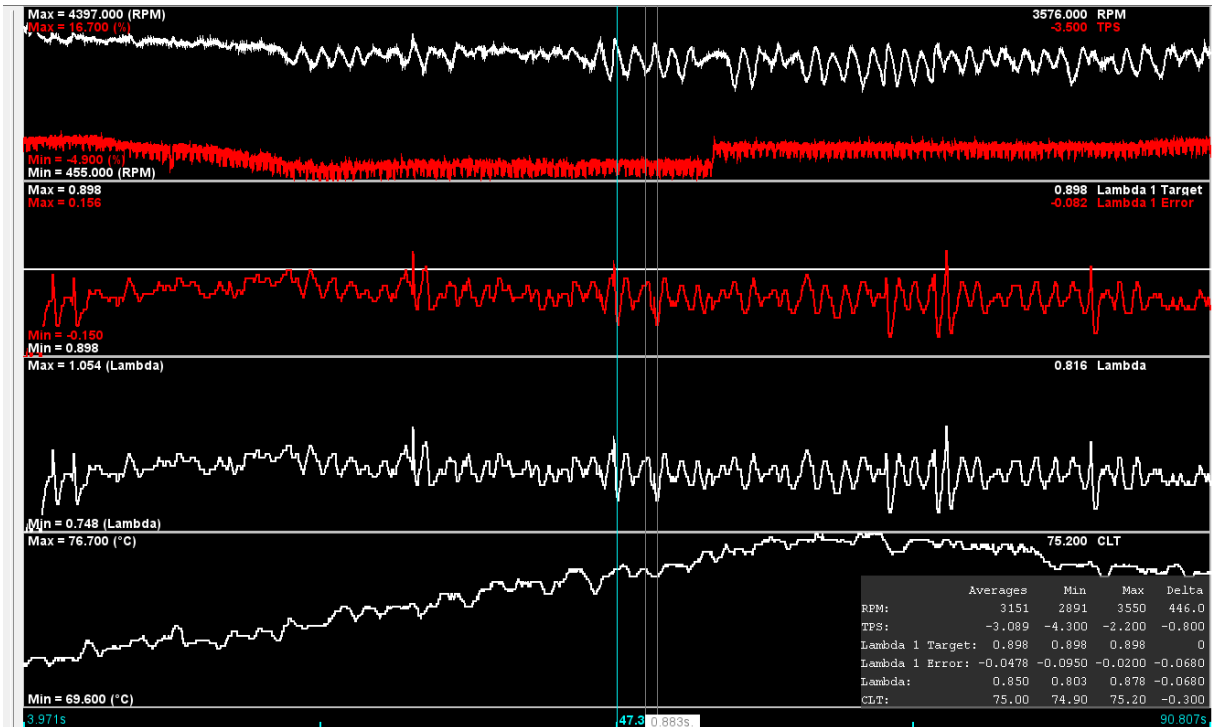
Figura 29 – Proposta de ganho proporcional 50%



Fonte: Elaborado pelo autor.

O teste do controlador ao utilizar 50% do ganho proporcional demonstrou bons valores de resposta e erros menores (próximos do *target* definido, com diferenças de aproximadamente 0.25 a 0.30 em relação ao valor definido de 0.9), quando comparado com somente o controlador ativo e sem aplicação dos erros; sendo assim, é um bom valor para ser utilizado, indicando dessa maneira a sequência dos testes, com a observação do comportamento através de novos valores.

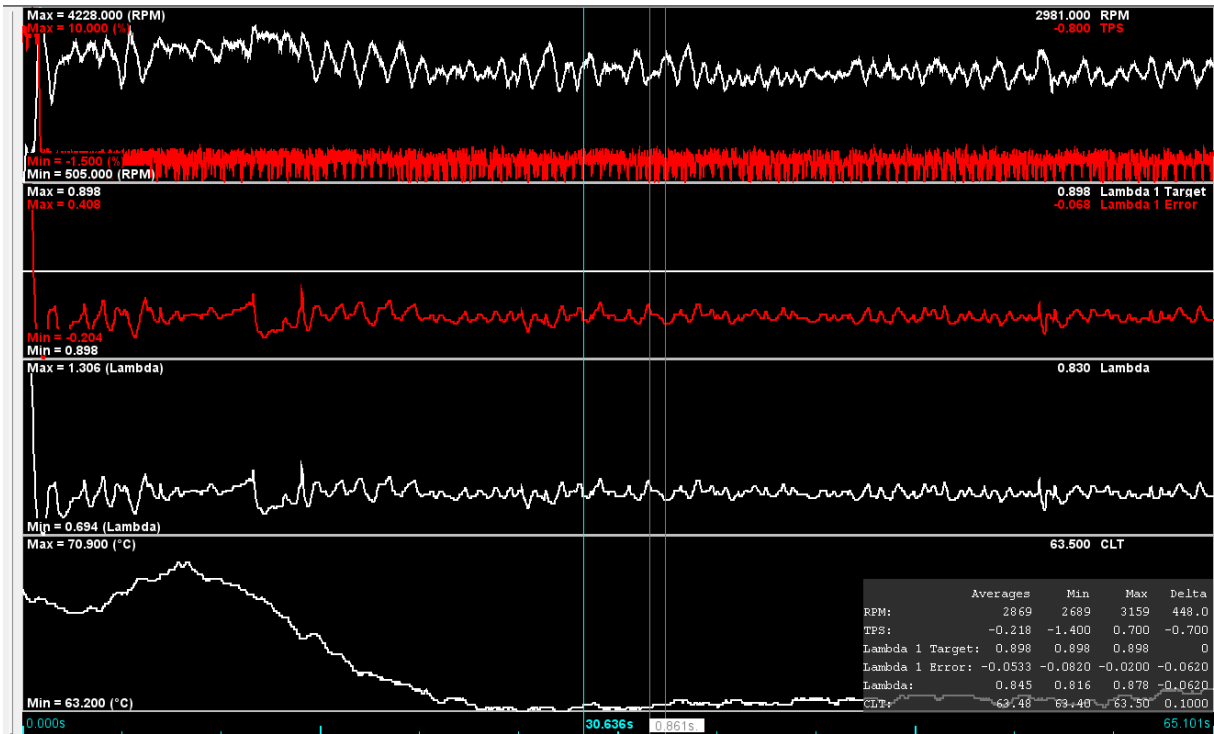
Figura 30 – Proposta de ganho proporcional 80%



Fonte: Elaborado pelo autor.

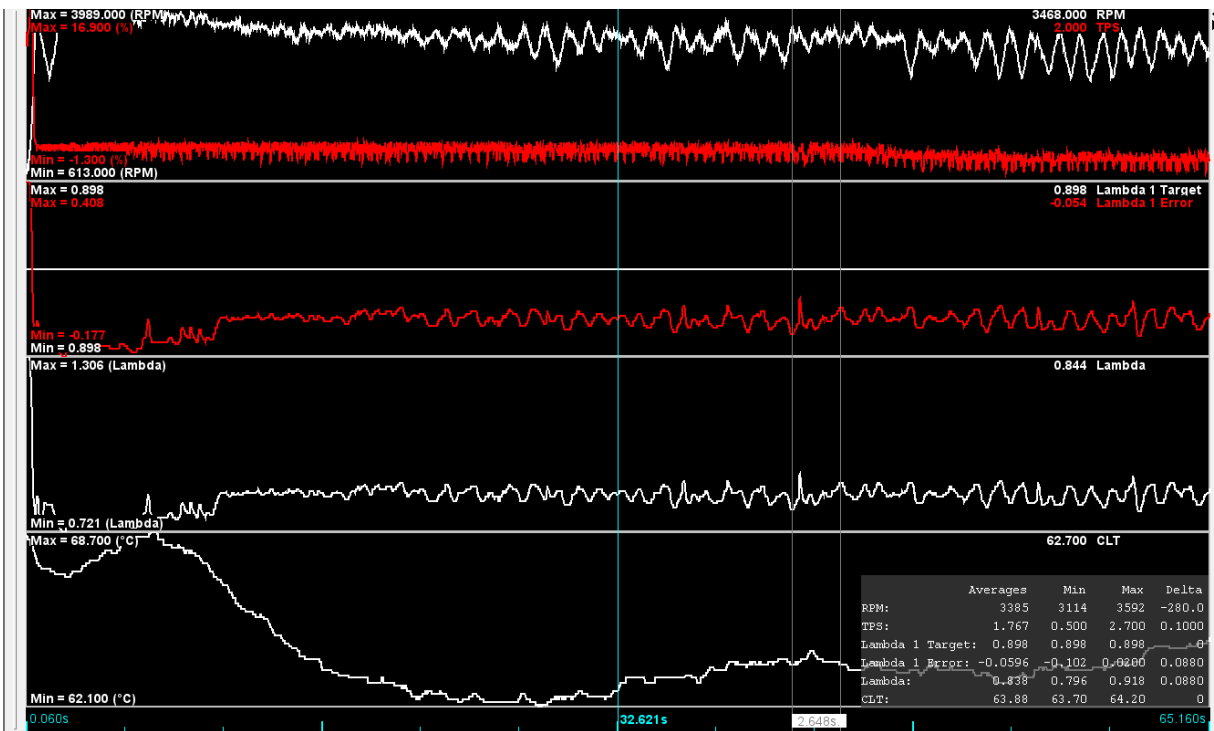
No teste do controlador ao utilizar 80% do ganho proporcional, em alguns momentos, o erro se aproxima de zero; no entanto, na maior parte de seu funcionamento esse valor mais agressivo do ganho proporcional fez com que se obtivesse majoritariamente misturas mais ricas do que o calibrado no *setpoint* do controlador, o que define um valor muito alto, que pode não trazer benefícios se utilizado na calibração.

Figura 31 – Proposta de ganho proporcional 50% e integral 10%



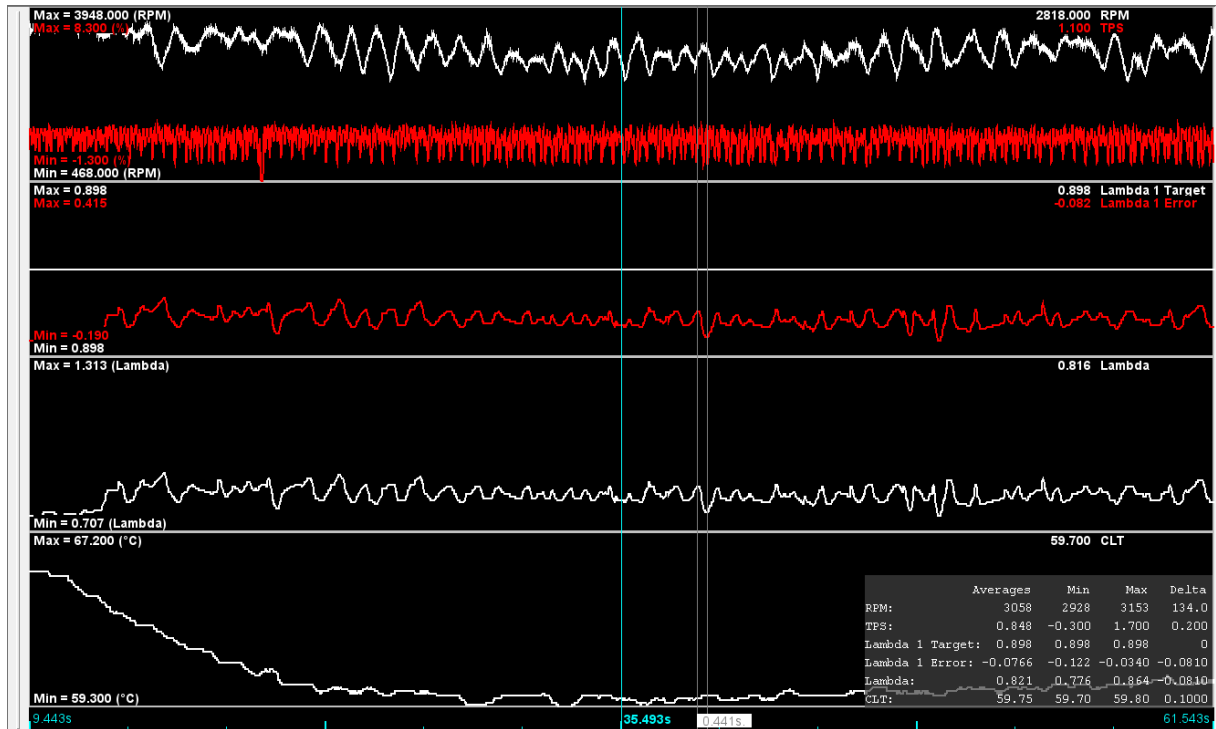
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 32 – Proposta ganho proporcional 50% e integral 20%



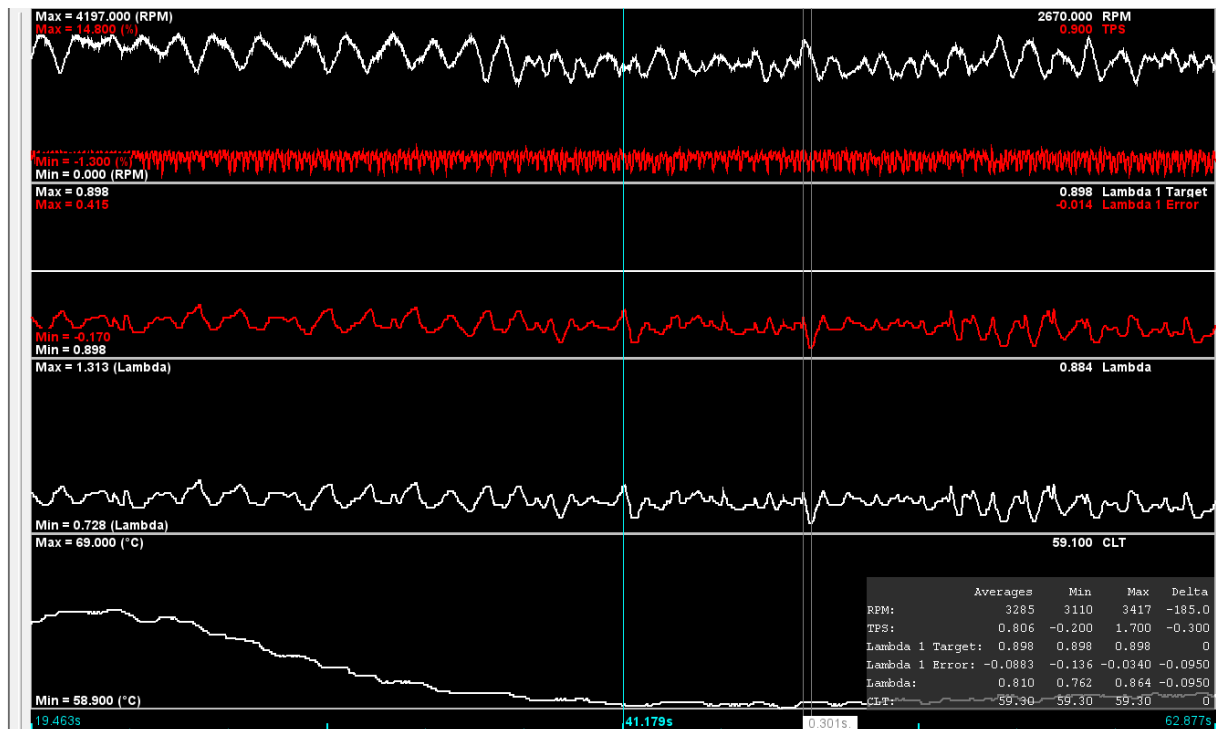
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 33 – Proposta ganho de proporcional 80% e integral 10%



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 34 – Proposta de ganho proporcional 80% e integral 20%



Fonte: Elaborado pelo autor.

No estudo da estratégia do ganho integral com alguns valores com diferentes *targets* de valor de *Lambda* para a análise, tem-se as variáveis: *RPM*, *TPS*, *Lambda 1 Target* (valor de sonda *lambda* que o controlador irá mirar em seu *setpoint*), *Lambda 1 error* (valor da diferença entre o valor do *setpoint* definido e o valor lido pelo sensor *lambda*), além da *CLT* pois é um dos parâmetros de ativação do controlador, que é calibrado para funcionar acima de 50°C.

Após a condução dos testes é possível concluir que a estratégia é funcional, sendo que os *setpoints* da sonda *lambda* mudam de acordo com o colocado no mapa do controlador, fato que é bom e demonstra que é possível a alteração dos *setpoints* de *lambda* e trabalhar com os valores dos ganhos do controlador.

Dessa forma, é possível a definição de um melhor compromisso, que utiliza valores mais refinados de todos os ganhos, empregando tanto o proporcional, quanto o integral, e por fim, o derivativo.

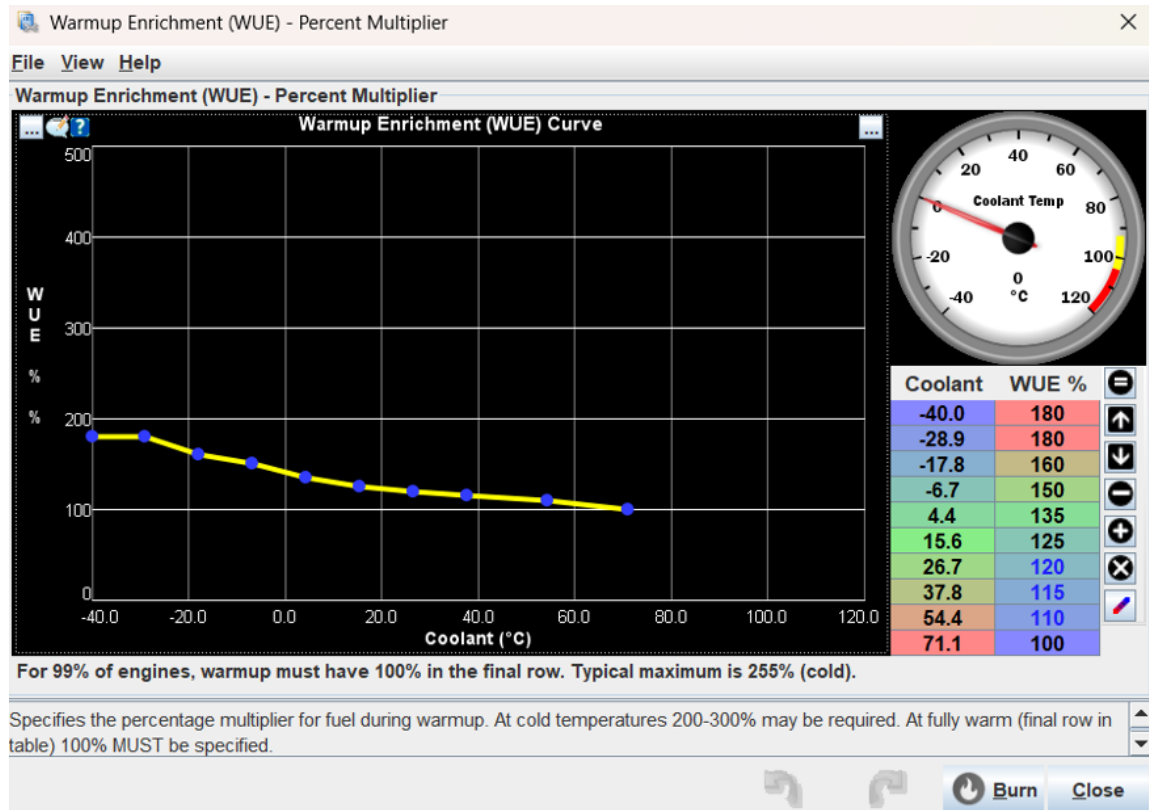
Ademais, em futuros trabalhos, deveria ser realizado o refino do mapa de combustível, base que definirá ganhos quando unido ao controlador em bom funcionamento, que possibilitaria também a realização de testes com o veículo em movimento e não somente em marcha lenta.

4.5 Teste de combustível durante *Warmup* do motor

Nesse teste, especificamente, buscou-se entender com um estudo o que ocorre com a aplicação de um combustível durante o aquecimento do motor após uma partida a frio.

A condição de partida a frio foi realizada com o veículo partindo na temperatura ambiente, e caracterizada como a primeira partida do dia. Dessa maneira, realizou-se apenas uma proposta quando se compara com o que se tem no mapa base. Assim, na Figura 35 são mostrados os valores da proposta, e na sequência, na Figura 36, os resultados obtidos do funcionamento dessa estratégia.

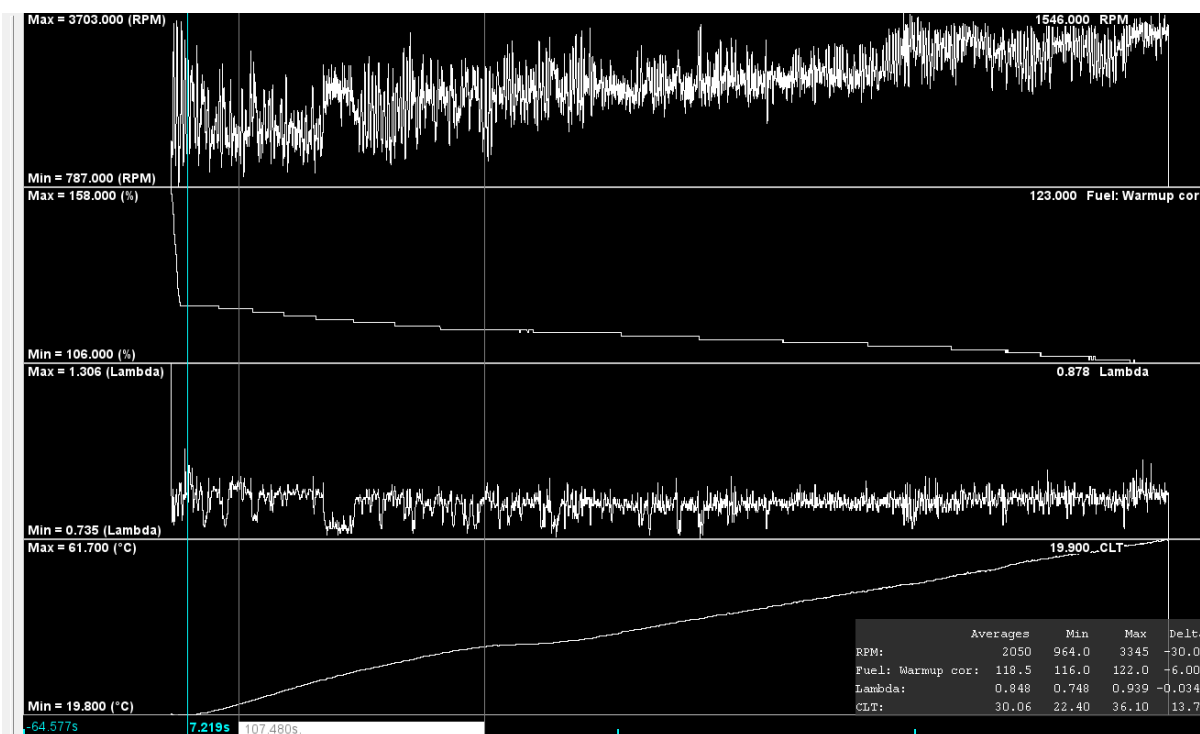
Figura 35 – Proposta valores de combustível durante *Warmup*



Fonte: Próprio Autor.

A figura 35 é a curva de porcentagem de combustível, mais utilizada em função da temperatura que o motor se encontra. A tendência dessa proposta, que é a estratégia mais indicada, é de se utilizar mais combustível com temperaturas da água do motor mais frias.

Figura 36 – Estratégia de combustível durante *Warmup* em funcionamento



Fonte: Próprio Autor.

Para essa análise, têm-se na tela as variáveis: *RPM*, *Fuel Warmup Cor* (porcentagem da correção de combustível utilizada ao longo do *warmup*) e a *CLT* (temperatura da água do motor).

O teste de *Warmup* aplica os valores inseridos no mapa com as devidas interpolações com relação aos *breakpoints* mostrados na curva de calibração mostrada na Figura 36, sendo uma estratégia válida principalmente quando se trata da relação de proteção do motor ao tempo de vida útil, pois o leve enriquecimento em temperaturas mais frias auxilia para que as paredes do cilindro sejam lubrificadas.

Fato que para a aplicação no formula SAE é interessante; pois não se dá foco maior na questão de emissões de poluentes, em que um enriquecimento exacerbado gera picos de poluentes como CO e NMHC, além do veículo não possuir catalisador no sistema utilizado o que por regra não é permitido.

5 Conclusões

Como resultado do presente trabalho, baseado nas análises e no estudo de algumas estratégias de calibração, é apresentado um estudo compreensivo de calibração de motores de injeção eletrônica programável para um motor de combustão interna de um veículo formula SAE.

Particularmente, é importante observar que as estratégias disponíveis são possibilidades que podem ser aproveitadas de modo a obter desempenho e confiabilidade para o motor utilizado pela equipe; sendo essencial conseguir conforme a calibração for evoluindo, averiguar a questão das curvas de torque e potência do motor. Isto porque, com os novos componentes (Coletor de admissão, coletor de escape, sistema linha de combustível) otimizados, em cada projeto desenvolvido pela equipe, esses componentes podem implicar na necessidade de reajustes na calibração para que seja possível refinar e melhorar ainda mais os principais objetivos da área do motor na equipe Fênix Racing Formula SAE.

Das análises e das estratégias de calibração realizadas, portanto, resultaram algumas ferramentas importantes, de modo que a equipe futuramente possa explorar ainda mais e compreender, como o sistema como um todo irá responder, conforme sejam realizadas modificações na calibração, visando extrair um melhor desempenho e uma maior confiabilidade do sistema de funcionamento do motor.

Principalmente, quando unificadas e aprimoradas cada uma das estratégias de calibração estudadas implicarão em benefícios, fato que assim como na indústria automotiva, quando se trabalha com várias estratégias calibradas e refinadas, resulta no melhor resultado possível dada as particularidades da aplicação em questão.

5.1 Trabalhos futuros

Partindo dos estudos realizados no presente trabalho, ficam alguns desafios que servem de motivações para futuros trabalhos:

- É possível testar e aproveitar melhor as estratégias → Confiabilidade e desempenho;

- Buscar realizar o refino dos mapas base de combustível e de avanço, pois a parte de calibração base é super importante para um projeto de calibração;
- Trabalhar com compensações e controles relacionados à tensão de bateria e alternador e tentar definir benefícios para o comportamento do motor;
- Explorar estratégias de corte de injeção para melhora de autonomia;
- Estudo do controlador da sonda de malha fechada com o veículo em movimento e também realizar o modelamento teórico do controlador;
- Unificar as estratégias em uma única calibração, o que implica numa análise mais robusta, como na indústria automotiva;
- Realizar estudos a respeito das propriedades do combustível que é utilizado no motor.

6 Referências

1. HEYWOOD, J. B. *Internal combustion engine fundamentals*. New York: McGraw-Hill, 1988.
2. FERGUSON, C. R.; KIRKPATRICK, A.T. *Internal combustion engines: applied thermosciences*. 2. ed. New York: Wiley, 2001.
3. SAE INTERNATIONAL. *FSAE 2024 rules*. Warrendale: SAE International, 2024. Disponível em: Acesso em: 12/02/2025.
4. BLAIR, G. P. *Design and simulation of four-stroke engines*. Warrendale: SAE International, 1999.
5. BRUNETTI, A. L. *Motores de combustão interna: fundamentos, componentes e sistemas*. São Paulo: Érica, 2012
6. BANISH, G. *Engine management: advanced tuning*. North Branch: CarTech Inc., 2007.
7. GUZZELLA, L.; ONDER, C. H. *Introduction to modeling and control of internal combustion engine systems*. 2. ed. Berlin: Springer, 2010
8. BOSCH. *Manual de tecnologia automotiva*. 5. ed. São Paulo: Ed. Bosch, 2004.
9. DENTON, T. *Automobile electrical and electronic systems*. 5. ed. London: Routledge, 2017.
10. PULKRABEK, W.W. *Engineering fundamentals of the internal combustion engine*. 2. ed. Upper Saddle River: Pearson Prentice Hall, 2004.

11. ARAS, V.P. *Design of Electronic Control Unit (ECU) for Automobiles – Electronic Engine Management System*. M. Tech. Project first stage report. Departamento de Engenharia Elétrica, Indian Institute of Technology Bombay, 2004.