

**UNIVERSIDADE DO ESTADO DO AMAZONAS - UEA**  
**ESCOLA SUPERIOR DE TECNOLOGIA – EST**  
**COORDENAÇÃO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**ADRIANO MELLO DO NASCIMENTO**

**PROJETO DE MELHORIA DE SISTEMA DE INJEÇÃO ELETRÔNICA DO**  
**MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA BMW M50TUB25 COM USO DE UNIDADE**  
**CONTROLADORA PROGRAMÁVEL E CONVERSÃO PARA ETANOL**

**MANAUS**

**2019**

**ADRIANO MELLO DO NASCIMENTO**

**PROJETO DE MELHORIA DE SISTEMA DE INJEÇÃO ELETRÔNICA DO  
MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA BMW M50TUB25 COM USO DE UNIDADE  
CONTROLADORA PROGRAMÁVEL E CONVERSÃO PARA ETANOL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado  
como requisito parcial à obtenção do título de  
bacharel em Engenharia Mecânica da  
Universidade Estado do Amazonas (UEA)

Orientador: Prof. Dr. João Evangelista Neto

**MANAUS**

**2019**

N244p Nascimento, Adriano Mello do

Projeto de melhoria de sistema de injeção eletrônica do motor de combustão interna BMW M50TUB25 com uso de unidade controladora programável e conversão para etanol / Adriano Mello do Nascimento. Manaus : [s.n], 2019.

98 f.: color.; 30 cm.

TCC - Graduação em Engenharia Mecânica -  
Universidade do Estado do Amazonas, Manaus, 2019.  
Inclui bibliografia

Orientador: Evangelista Neto, Dr. João

1. Injeção. 2. Programável. 3. Controle. 4. Motor.

5. Etanol. I. Evangelista Neto, Dr. João (Orient.). II. Universidade do Estado do Amazonas. III. Projeto de melhoria de sistema de injeção eletrônica do motor de combustão interna BMW M50TUB25 com uso de unidade controladora programável e conversão para etanol


**ADRIANO MELLO DO NASCIMENTO**

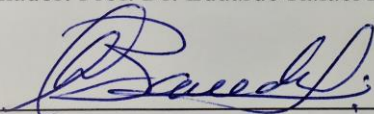
**PROJETO DE MELHORIA DE SISTEMA DE INJEÇÃO ELETRÔNICA DO  
MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA BMW M50TUB25 COM USO DE UNIDADE  
CONTROLADORA PROGRAMÁVEL E CONVERSÃO PARA ETANOL**

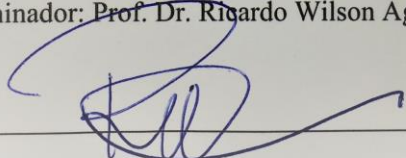
Este Trabalho de Curso foi considerado adequado para obtenção do título de bacharel em Engenharia Mecânica/Naval da Universidade do Estado do Amazonas (UEA) e aprovado em sua forma final pela comissão examinadora.

Banca examinadora:

Orientador: Prof. Dr. João Evangelista Neto

  
Examinador: Prof. Dr. Eduardo Rafael Barreda del Campo

  
Examinador: Prof. Dr. Ricardo Wilson Aguiar da Cruz



*Dedico este trabalho de curso ao meu pai  
Paulo Sérgio Santos do Nascimento e minha mãe  
Maria Cristina Paes de Mello pelo carinho e amor  
dedicado, pois a cada degrau por mim  
alcançado e em todas as minhas conquistas  
estiveram sempre ao meu lado*

## **AGRADECIMENTOS**

Para elaboração e apresentação deste trabalho várias pessoas me ajudaram e me apoiaram de forma incondicional, e agradecer é o mínimo que eu posso fazer para demonstrar minha gratidão. Então, agradeço, primeiramente à Deus, por estar sempre comigo me dando a força necessária para seguir sempre pelo caminho correto e honesto da vida.

Agradeço também a todas as pessoas e entidades que contribuíram para que eu pudesse desenvolver e concluir este trabalho. E foram muitos os que, de alguma forma, direta ou indireta, deram essa contribuição.

Não posso furtar-me a registrar o meu agradecimento aos professores Dr. João Evangelista Neto e Dr. Antonio Cláudio Kieling de Engenharia Mecânica, a todos os funcionários e a Coordenação e aos meus colegas de curso, com os quais pude estabelecer uma convivência pessoal e intelectual ao longo de todo esse tempo.

Agradeço ainda a todas as pessoas que, na UEA, tornaram possível que eu pudesse fazer esse curso e realizar o meu trabalho de pesquisa.

Um agradecimento muito especial aos amigos Nilton e Nilton Filho por ajudar-me com referências bibliográficas sobre a área de estudo.

Agradeço ainda aos meus familiares e namorada, obrigados a conviver com as tensões, incertezas, angústias, momentos de frustração e de desânimo, sucedendo-se ao longo de meses e meses de estudo, e, por certo, afetando-os de algum modo. A eles dedico a minha alegria por chegar ao fim deste percurso.

A todos estes (e a todos aqueles que, por falha minha, não foram mencionados) o meu muito obrigado.

“Somos continuamente confrontados com grandes oportunidades brilhantemente disfarçadas de problemas insolúveis.”

Lee Iacocca

## RESUMO

O controle de motores a combustão interna traduz o avanço tecnológico da indústria automotiva nas últimas décadas. Tal controle que passou de um carburador com funcionamento totalmente mecânico para um sistema complexo de sensores, atuadores e unidade controladora. Esta pesquisa estuda o sistema de injeção eletrônica do motor de combustão interna a gasolina BMW M50TUB25 e a substituição deste sistema por um controlador programável mais rápido, moderno e confiável, a fim de explorar da melhor forma possível a eficiência que este motor pode gerar. É pesquisado e analisado o melhor sistema de injeção programável disponível no mercado para este projeto, visando melhor desempenho, confiabilidade e baixo custo de manutenção. Os componentes do sistema de alimentação de combustível são calculados e selecionados para uso de etanol e uma potência maior. Estuda-se a calibração deste motor utilizando etanol, um combustível de maior octanagem e que gera mais potência, analisando cada parâmetro de injeção de combustível e avanço de ponto de ignição e o que significa e como altera o funcionamento do motor. É comprovado a vantagem de utilizar um sistema de injeção programável em um automóvel antigo, que possui componentes e concepções de projeto mais antigos e que foi calibrado com uma composição de combustível que não é mais encontrado atualmente.

**Palavras-Chaves:** Injeção; Programável; Controle; Motor; Etanol.



## ABSTRACT

Internal combustion engine controllers reflect the technological advancement of the automotive industry in recent decades. This control went from a fully mechanical carburetors to a complex system of sensors, actuators and controller unit. This research studies the electronic fuel injection system in a gasoline internal combustion engine made by BMW model M50TUB25 and replace this system with a faster, more modern and reliable programmable controller to explore the best performance that the engine can output. The best programmable injection system available on the market for this project is researched and analyzed aiming the best performance, usage and low maintenance cost. Fuel delivery components are dimensioned to use ethanol and a higher power output. Calibration of this engine is studied using ethanol, a higher-octane fuel, analyzing each fuel injection parameter and timing advance curve and what it means and how it alters engine operation. The advantage of using a programmable electronic fuel injection system in an older car, which has older components and designs and has been calibrated to a fuel composition that is no longer found today, is proven to be advantageous.

**Keywords:** Injection; Programable; Control; Engine; Ethanol.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 2.1 – Motor a combustão interna Ciclo Otto 1876 (Fonte: Martins, 2005).....</b>	<b>18</b>
<b>Figura 2.2 – (a) Diagrama PV (b) Diagrama TS para um Ciclo Otto (Fonte: Heywood, 1988).....</b>	<b>19</b>
<b>Figura 2.3 – Quatro tempos de um motor IC (Fonte: Baêta, 2006) .....</b>	<b>21</b>
<b>Figura 2.4 – Componentes interno MCI (Fonte: Revista Techspeed, 2018).....</b>	<b>22</b>
<b>Figura 2.5 – Sistema de injeção eletrônica por malha fechada. (Fonte: MTE-Thompson, 2019).....</b>	<b>26</b>
<b>Figura 2.4 – Mapa principal de injeção (2D) (Fonte: Autoria própria, software FTManager V4.11, 2019).....</b>	<b>28</b>
<b>Figura 2.5 – Compensação por RPM (2D) (Fonte: Autoria própria, software FTManager V4.11, 2019) .....</b>	<b>28</b>
<b>Figura 2.6 – Tabela de injeção MAP x RPM (Fonte: Autoria própria, software FTManager V4.11, 2019) .....</b>	<b>29</b>
<b>Figura 2.7 – Compensação por temperatura de motor. (Fonte: Autoria própria, Software FTManager V4.11, 2019).....</b>	<b>29</b>
<b>Figura 4.1 – Regulador de pressão 0 280 160 597 3,5 bar. (Fonte: Catálogo Bosch 2010) .....</b>	<b>36</b>
<b>Figura 4.1 – Válvula injetora de combustível 0 280 150 415. (Fonte: Catálogo Bosch 2010) .....</b>	<b>36</b>
<b>Tabela 4.1 - Tabela comparativa injetores Bosch. (Fonte: Autoria própria com dados retirados do catálogo Bosch 2010).....</b>	<b>37</b>
<b>Figura 4.2 – Oscilação de sinal de sensor de oxigênio. (Fonte: Revista Techspeed, 2018)</b>	<b>38</b>
<b>Figura 4.3 – Válvula injetora de combustível 0 280 155 968. (Fonte: Catálogo Bosch 2010) .....</b>	<b>39</b>

<b>Figura 4.4 – Aplicação bomba de combustível Bosch 0 580 314 076. (Fonte: Bosch 2010)</b> .....	<b>40</b>
<b>Figura 4.5 - Módulo de injeção original Bosch 0 261 200 413. (Fonte: Autor) .....</b>	<b>42</b>
<b>Figura 4.6 – Sensor de fluxo de massa de ar Bosch 0 280 217 502. (Fonte: Catálogo online Bosch, 2019).....</b>	<b>42</b>
<b>Figura 4.7 – Diagrama de mangueira de vácuo do coletor de admissão. (Fonte: Cardiagn, 2019).....</b>	<b>43</b>
<b>Figura 4.8 – Sensor de oxigênio Bosh 0 280 005 324 – (Fonte: Catálogo Online Bosch, 2019)</b> .....	<b>44</b>
<b>Figura 4.9 – Sensor de oxigênio Bosch LSU 4.2 0 258 007 351. (Fonte: Catálogo Online Bosch, 2019).....</b>	<b>45</b>
<b>Figura 4.10 – Gráfico gerado por sinal de sensor de rotação utilizando osciloscópio. (Fonte: Site Doutor IE, 2019).....</b>	<b>46</b>
<b>Figura 4.11 – Sensor de rotação indutivo Bosch 0 261 210 053. (Fonte: Catálogo online Bosch, 2019).....</b>	<b>47</b>
<b>Figura 4.12 – Sensor de fase Bosch 0 232 103 003. (Fonte: Catálogo online Bosch, 2019)</b> .....	<b>47</b>
<b>Figura 4.13 – Sensor de posição de acelerador (Fonte: LÖWE Automobil, 2019). .....</b>	<b>48</b>
<b>Tabela 4.4 – Ligação de sensor PS10-A/B. (Fonte: Fueltech, 2019) .....</b>	<b>50</b>
<b>Figura 4.14 – Sistema de comando variável VANOS. (Fonte: RealOem, 2019).....</b>	<b>52</b>
<b>Tabela 4.5 – Tabela comparativa de preços Fueltech. (Fonte: Fueltech, 2019).....</b>	<b>53</b>
<b>Tabela 4.6 – Tabela comparativa de preços Injepro. (Fonte: Injepro, 2019) .....</b>	<b>54</b>
<b>Figura 4.15 – Módulo de ECU Fueltech FT500 LITE. (Fonte: Fueltech, 2019) .....</b>	<b>54</b>
<b>Figura 4.16 – Módulo de ECU Fueltech FT500. (Fonte: Fueltech, 2019).....</b>	<b>55</b>

<b>Figura 4.17 – Módulo de ECU Fueltech FT550. (Fonte: Fueltech, 2019).....</b>	<b>56</b>
<b>Figura 4.18 – Tela sensível ao toque Injepro. (Fonte: Injepro, 2019) .....</b>	<b>57</b>
<b>Figura 4.19 – Conector A Fueltech FT550. (Fonte: Fueltech, 2019) .....</b>	<b>58</b>
<b>Figura 4.20 – Conector B Fueltech FT550. (Fonte: Fueltech, 2019) .....</b>	<b>58</b>
<b>Figura 4.21 – Ligação de sensores principais. (Fonte: Fueltech, 2019) .....</b>	<b>60</b>
<b>Figura 4.22 – Ligação de bicos injetores. (Fonte: Fueltech, 2019) .....</b>	<b>60</b>
<b>Figura 4.23 – Ligação do módulo SparkPRO 6. (Fonte: Fueltech, 2019).....</b>	<b>61</b>
<b>Figura 4.24 – Ligação de bobina de ignição. (Fonte: Fueltech, 2019).....</b>	<b>61</b>
<b>Figura 4.27 – Configuração de módulo ECU, tipos de mapa e funções. (Fonte: Autor, software FT Manager, 2019) .....</b>	<b>62</b>
<b>Figura 4.28 – Configuração de características do motor. (Fonte: Autor, software FT Manager, 2019).....</b>	<b>63</b>
<b>Figura 4.29 – Configuração de sinal de rotação do motor. (Fonte: Autor, software FT Manager, 2019).....</b>	<b>63</b>
<b>Figura 4.30 – Configuração características do sistema de ignição. (Fonte: Autor, software FT Manager, 2019).....</b>	<b>64</b>
<b>Figura 4.31 – Configuração características do sistema de injeção. (Fonte: Autor, software FT Manager, 2019).....</b>	<b>65</b>
<b>Figura 4.32 – Configuração características do pedal, borboleta e atuador de marcha lenta. (Fonte: Autor, software FT Manager, 2019) .....</b>	<b>66</b>
<b>Figura 4.33 – Mapa de alvos de valores de lambda em malha fechada. (Fonte: Autor, software FT Manager, 2019) .....</b>	<b>67</b>
<b>Figura 4.34 – Mapa principal de injeção simplificado do motor BMW. (Fonte: Autor, software FT Manager, 2019) .....</b>	<b>68</b>

<b>Figura 4.35 – Mapa de injeção de correção por rpm do motor BMW. (Fonte: Autor, software FT Manager, 2019).....</b>	<b>69</b>
<b>Figura 4.36 – Compensação de injeção por temperatura do motor BMW. (Fonte: Autor, software FT Manager, 2019).....</b>	<b>70</b>
<b>Figura 4.37 – Compensação de combustível por temperatura do ar de admissão do motor BMW. (Fonte: Autor, software FT Manager, 2019).....</b>	<b>71</b>
<b>Figura 4.38 – Mapa de controle de injeção em marcha lenta do motor BMW. (Fonte: Autor, software FT Manager, 2019).....</b>	<b>72</b>
<b>Figura 4.39 – Tempo de injeção de partida do motor BMW. (Fonte: Autor, software FT Manager, 2019).....</b>	<b>73</b>
<b>Figura 4.40 – Mapa principal de ignição do motor BMW. (Fonte: Autor, software FT Manager, 2019).....</b>	<b>74</b>
<b>Figura 4.41 – Compensação de avanço de ignição por MAP do motor BMW. (Fonte: Autor, software FT Manager, 2019).....</b>	<b>75</b>
<b>Figura 4.42 – Compensação de avanço de ignição por temperatura do motor BMW. (Fonte: Autor, software FT Manager, 2019).....</b>	<b>76</b>

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 4.1 - Tabela comparativa injetores Bosch. (Fonte: Aatoria própria com dados retirados do catálogo Bosch 2010).....</b>	<b>37</b>
<b>Tabela 4.4 – Ligação de sensor PS10-A/B. (Fonte: Fueltech, 2019) .....</b>	<b>50</b>
<b>Tabela 4.5 – Tabela comparativa de preços Fueltech. (Fonte: Fueltech, 2019).....</b>	<b>53</b>
<b>Tabela 4.6 – Tabela comparativa de preços Injepro. (Fonte: Injepro, 2019) .....</b>	<b>54</b>

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

<b>ANP</b>	Agência Nacional do Petróleo
<b>BFSC</b>	Brake Specific Fuel Consumption
<b>BMW</b>	Bayerische Motoren Werke
<b>ECU</b>	Engine Control Unit
<b>LSU</b>	Lambda Sensor Unit
<b>MAF</b>	Mass Air Flow
<b>MAP</b>	Manifold Air Pressure
<b>MCI</b>	Motor de Combustão Interna
<b>PA</b>	Poliamida
<b>PEAD</b>	Polietileno de Alta Densidade
<b>PMI</b>	Ponto Morto Inferior
<b>PMS</b>	Ponto Morto Superior
<b>RPM</b>	Rotação Por Minuto
<b>TPS</b>	Throttle Position Sensor
<b>VANOS</b>	Variable Nockenwellen Steuerung

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>12</b>
1.1. Problematização e hipóteses .....	14
1.2. Delimitação de estudo .....	15
1.3. Objetivos.....	16
1.3.1. Objetivo Geral.....	16
1.3.2. Objetivos Específicos .....	16
1.4. Justificativa.....	16
<b>2. REFERÊNCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>18</b>
2.1. Motores de Combustão Interna Ciclo Otto - História e Definição .....	18
2.2. Clico ideal de trabalho de um Motor de combustão interna.....	19
2.3. Princípio de funcionamento de um motor de combustão interna .....	20
2.4. Componentes de um motor a combustão interna e sistema de alimentação de combustível 22	
2.5. Sistema de controle por malha aberta.....	24
2.6. Sistema de controle por malha fechada .....	24
2.7. Funcionamento de um sistema de injeção eletrônica .....	25
2.8. Dimensionamento do sistema de alimentação de combustível .....	26
2.9. Mapeamento e método de injeção de combustível.....	27
2.10. Método de ignição de mapeamento de avanço de ignição.....	30
<b>3. METODOLOGIA.....</b>	<b>32</b>
3.1. Métodos .....	32
3.2. Técnicas .....	33
3.3. Procedimentos .....	33
<b>4. ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS .....</b>	<b>35</b>
4.1. Dimensionamento de componentes de sistema de alimentação de combustível.....	35
4.1.1. Válvulas injetoras de combustível .....	36
4.1.2. Bomba de combustível.....	39
4.2. Componentes de sistema de ignição .....	41
4.2.1. Bobinas de ignição .....	41
4.2.2. Velas de ignição .....	41



4.3.	Sistema de injeção eletrônica original Bosch MOTRONIC.....	41
4.3.1.	Sensor de fluxo de massa de ar Bosch 0280217502.....	42
4.3.2.	Sensor de oxigênio Bosch 0 258 005 324.....	43
4.3.3.	Sensor de rotação.....	45
4.3.4.	Sensor de fase.....	47
4.3.5.	Sensor TPS.....	48
4.3.6.	Sensor de temperatura do ar de admissão.....	48
4.3.7.	Sensor de temperatura do motor.....	49
4.3.8.	Sensor de pressão de óleo.....	50
4.3.9.	Sensor de detonação.....	51
4.3.10.	Comando variável.....	51
4.4.	Seleção do sistema de injeção programável.....	52
4.4.1.	Comparação dos sistemas de injeção eletrônica por custo.....	53
4.4.2.	Análise qualitativa dos sistemas de injeção programável.....	54
4.4.2.1.	Fueltech FT500 LITE e Fueltech FT500.....	54
4.4.2.2.	Fueltech FT550.....	55
4.4.2.3.	Injepro SFI6 e Injepro S8000.....	57
4.5.	Instalação elétrica.....	58
4.6.	Software de configuração do módulo de injeção programável.....	61
4.7.	Configuração de mapa de injeção de combustível.....	66
4.8.	Configuração de mapa de avanço de ponto de ignição.....	73
<b>5.</b>	<b>SÍNTESE CONCLUSIVA.....</b>	<b>77</b>
5.1.	Conclusão.....	77
5.2.	sugestões para trabalhos futuros.....	77
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>78</b>
	<b>Apêndice A.....</b>	<b>81</b>
	<b>Apêndice B.....</b>	<b>82</b>
	<b>Apêndice C.....</b>	<b>83</b>
	<b>Apêndice D.....</b>	<b>85</b>

<b>Apêndice E .....</b>	<b>89</b>
<b>Apêndice F.....</b>	<b>92</b>
<b>Apêndice G.....</b>	<b>93</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Um motor à combustão interna com ignição por centelha utilizado em automóveis atualmente são controlados por injeções eletrônicas. Estes sistemas de injeção eletrônica vêm sendo empregados há mais de 30 anos em veículos de passeio, e tem a função de controlar eletronicamente a injeção de combustível e ignição de um motor, substituindo os carburadores e distribuidores de centelha. Ao longo destes anos, as injeções eletrônicas vêm sendo atualizadas e melhoradas, principalmente visando ganho de desempenho, diminuição de emissões e utilização de mais sensores e atuadores que permitem um melhor funcionamento do motor.

No início dos anos 2000, foi iniciado um desenvolvimento tecnológico de injeções eletrônicas programáveis, as quais foram idealizadas para substituir sistemas de carburação ou substituir injeções eletrônicas originais em carros com preparação de motor para aumento de potência. Estes equipamentos permitem programar os parâmetros de injeção e ignição de acordo com as características do motor e combustível utilizado. Neste projeto haverá uma conversão do combustível, de gasolina 87 octanas para etanol, ajustando tais parâmetros para o motor com este combustível.

O motor que será estudado (BMW M50TUB26) possui características mecânicas modernas mesmo tendo sido projetado no início da década de 90 (foi lançado em setembro de 1992). Porém, atualmente este motor perdeu sua eficiência principalmente pelo fato de o seu software de injeção eletrônica ter sido desenvolvido com base em um combustível com menor teor de etanol.

O motor M50TUB25 é uma atualização técnica do motor M50B25. É um motor quatro tempos à gasolina, 6 cilindros em linha, 2494 cilindradas cúbicas, comando de válvulas duplo variável na admissão e quatro válvulas por cilindro, sendo duas de admissão e duas de escapamento. O sistema de injeção é feito por 6 válvulas de injeção de combustível Bosch multifuros localizados no coletor de admissão, e o sistema de ignição é composto por seis bobinas individuais por cilindro, ambos gerenciados por um ECU (*Engine Control Unit*) desenvolvido pela fabricante Bosch.

Toda esta tecnologia empregada fazia o motor entregar 192 cv de potência e 25 kgfm de torque no virabrequim, isto com a qualidade do combustível na época. É notória redução da potência gerada e aumento do consumo de combustível ao usar a gasolina comum encontrada

nos postos de gasolina. Esta perda será medida com dinamômetro com o carro totalmente original, sem nenhuma alteração ao que foi projetado.

O objetivo deste trabalho é o projeto de instalação de uma injeção programável que irá permitir recuperar esta potência e torque perdidos ou até mesmo o seu comparado ao sistema original, espera-se obter isso com o uso do etanol como combustível por ter uma octanagem superior à gasolina comum. Ao ter este poder de programação dos parâmetros de injeção e ignição, será possível estudar a influência do avanço de ponto de ignição com a troca de combustível para etanol. Este veículo no futuro terá uso em competições de arrancada e terá modificações no motor utilizando indução forçada, esta injeção eletrônica programável permitirá que os mapas de injeção e ignição sejam modificados para quando houver pressão positiva no coletor de admissão.

O método de injeção de combustível será sequencial, assim como a injeção original. Cada válvula injetora será controlada individualmente, e os pulsos de combustível serão programados para que ocorram exatamente quanto a válvula de admissão esteja aberta. Uma grande vantagem em cima de métodos semissequenciais que desperdiçam um pulso de combustível com a válvula fechada. Isto será possível usando um sensor de fase indutivo que irá monitorar a posição dos comandos de válvula. Isto faz com que o sistema de injeção seja muito eficiente.

Da mesma forma que na injeção de combustível, o método de ignição será sequencial, utilizando as bobinas individuais originais com um módulo gerenciando externamente. Isto faz com que a centelha de ignição seja enviada no momento certo para a combustão, e o ponto onde é iniciado é controlado pela ECU da injeção programável de acordo com o mapa de avanço de ponto de ignição criado.

Uma das grandes vantagens de uma injeção programável é a instrumentação do sistema, ou seja, é possível implantar diversos sensores para monitorar e ajudar no desenvolvimento de mapas de injeção e ignição. Como por exemplo, sonda lambda de banda larga que monitora a misturas de gases de combustão (para atuar em regime de malha fechada em conjunto com a injeção de combustível), sensor de detonação, sensor de pressão de óleo do motor, sensor de temperatura de líquido de arrefecimento, sensor de pressão de coletor de admissão, sensor de posição de corpo de borboleta, sensor de rotação do virabrequim, sensor de fase dos comandos de válvulas e etc. Estas informações podem ser monitoradas em tempo real por um monitor,

ajudando na detecção de alguma anormalidade no funcionamento do motor e no acerto de mapa de injeção e ignição.

### 1.1. PROBLEMATIZAÇÃO E HIPÓTESES

As injeções eletrônicas desenvolvidas nos anos 90, como a utilizada no motor que será estudado, possuem processadores lentos e poucos recursos de correção de mapas para manter o funcionamento do motor constante, eficiente e econômico. Desde a época que esta injeção foi calibrada pela fábrica, houve mudanças na composição da gasolina, principalmente no volume de etanol na mistura (27% de álcool anidro, segundo a Agência Nacional do Petróleo). Isto faz com que a queima da mistura ar-combustível na câmara de combustão seja ineficiente. Com o uso de uma injeção programável é possível calibrar os mapas de injeção e ignição de acordo com o combustível que está sendo queimado, fazendo correções mais rápidas por terem mais recursos e tempo de processamento mais curto.

Todo o sistema de injeção eletrônica utilizado neste veículo possui componentes muito específicos para este automóvel, como o ECU (Unidade de Controle de Motor), sensores de temperatura de ar e motor, de fluxo de ar (MAF), bicos injetores e atuadores de marcha lenta. Com um veículo desta idade, muitos destes componentes falham e precisam ser substituídos, porém, pela pouco número de vendas do veículo no Brasil, estes componentes são muito difíceis de serem encontrados no mercado de autopeças, tornando o preço destes muito elevados. E se forem comprados na concessionária, terão que ser importados da fábrica e com preços muito altos, chegando até 25% do valor de mercado do veículo. Com a utilização de um sistema de injeção programável elimina-se esse problema, a confiabilidade do sistema é muito maior por utilizar componentes novos, assim como há uma facilidade de utilizar diversos componentes encontrados no mercado nacional de autopeças, pois o módulo de injeção é compatível com praticamente todos os tipos de sensores e atuadores produzidos atualmente.

Uma das grandes limitações da gasolina comum encontrada nos postos de gasolina é sua baixa octanagem (87 octanas, segundo a Agência Nacional do Petróleo<sup>3</sup>), o que não permite motores de alta performance operarem plenamente, extraindo o máximo de potência de acordo como foi calibrado o ECU do veículo. Em Manaus, não é distribuído gasolina com octanagem maior de classificação Podium, que possuem 97 octanas, a qual seria uma opção para extrair mais potência e torque do motor. A melhor opção para ganho de potência no motor é utilizar o etanol vendido nos postos, além do custo por litro ser menor que da gasolina comum, possui uma octanagem de 110, permitindo-se extrair mais potência com taxa de compressão dinâmica

e estática superior e avanço de ignição mais agressivo, pois a resistência à detonação do etanol é superior, além de ter uma massa específica maior comparada a gasolina comum.

## 1.2. DELIMITAÇÃO DE ESTUDO

O estudo inicia ao coletar dados sobre o funcionamento da injeção eletrônica original do motor M50TUB25, fazendo análises quantitativas e qualitativas. Será analisado o valor em Reais do sistema completo, a sua eficiência com um sistema de pontos, instalação de sonda banda larga para análise da queima do combustível e medições de potência e torque no dinamômetro de rolos.

Após este estudo inicial, será pesquisado no mercado nacional os sistemas de injeções eletrônicas disponíveis, classificando-as quanto o seu valor em Reais, análise qualitativa de seus recursos e funções, análise do software de ajustes de mapas, melhor adequação ao projeto e suporte de engenharia de desenvolvimento.

O dimensionamento destes componentes para converter o veículo para etanol é uma das partes do estudo mais importantes para um bom resultado, estes componentes são principalmente a bomba de combustível, linha de combustível, regulador de pressão de combustível e válvulas injetoras de combustível. É necessário que seja tudo dimensionado de acordo com a potência final que se estima do motor, com um fator de segurança e de acordo com a composição química e poder calorífico do combustível. Tudo isso deve ser considerado para que haja um bom funcionamento do motor, principalmente garantir se o motor será alimentado por combustível em todos os regimes de trabalho.

Após isto será realizada a instalação do sistema de injeção escolhido e dos componentes dimensionados para a conversão de combustível e criação dos parâmetros de injeção e ignição base para fazer o motor funcionar. A partir disto será possível calibrar a injeção eletrônica coletando dados de logs dos testes em dinamômetro, iniciando o estudo das curvas de ponto de ignição de acordo com diversos parâmetros como rotação do motor, pressão no coletor de admissão, temperatura do ar de admissão do motor e temperatura do motor. Com isto será possível gerar gráficos e tabelas para concluir os estudos de ponto de ignição em relação ao rendimento do motor utilizando etanol como combustível.

### 1.3. OBJETIVOS

#### 1.3.1. OBJETIVO GERAL

O estudo do sistema de injeção eletrônica Bosch MOTRONIC e substituição deste por um sistema moderno de injeção programável é o objetivo principal deste projeto, pois tornará o funcionamento do motor muito mais confiável e constante. E uma grande melhoria será a conversão de combustível de gasolina para etanol, aumentando a potência gerada pelo motor com um refinamento na calibração de avanço de ponto de ignição.

#### 1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos serão atingidos por fases do projeto. O primeiro é ter uma base de dados sobre a injeção original, estudo de cada componente utilizado no sistema de injeção eletrônica, estudo de métodos de injeção de combustível e ignição. Leitura de dados de sensores com o auxílio de scanner para diagnóstico de injeções eletrônicas. Obter dados de potência e torque com o auxílio de um dinamômetro de rolos no estado original do veículo. É importante obter-se valores de temperatura e humidade do ar no momento dos testes em dinamômetro pois isto pode influenciar no rendimento do motor.

Determinar qual a injeção eletrônica mais adequada para o projeto assim como dimensionar os componentes necessários para a conversão de combustível são os objetivos da segunda etapa deste projeto. Instalar e calibrar todo o sistema de injeção é o objetivo seguinte do projeto, para que seja possível o objetivo final de coletar dados de ponto de ignição para fazer um aprimoramento do mapa de acordo com o combustível usado e condições diversas do funcionamento do motor.

### 1.4. JUSTIFICATIVA

A instalação de uma injeção programável irá permitir que se recupere este rendimento perdido ou até mesmo o aumento de potência e torque comparado ao sistema original, espera-se obter isso com o uso do etanol como combustível por ter uma octanagem superior à gasolina comum.

O ECU é o principal equipamento de todo o sistema de injeção eletrônica. Ele é o computador que gerencia todo o sistema de injeção de combustível e ignição, assim como alguns atuadores que são acessórios do motor. Com um sistema de injeção eletrônica programável moderno é possível controlar também o acionamento do ar condicionado, acionamento de ventiladores induzir ar no radiador para controlar a temperatura do líquido de

arrefecimento, gerenciar um controle de tração ativo, recebendo sinais de rotações da roda e corrigindo a potência do motor para evitar descontrolar o veículo, assim como de muitos veículos modernos. Isto fará com que um veículo projetado há mais de 25 anos seja capaz de comportar-se como um veículo atual, confiável e eficiente.

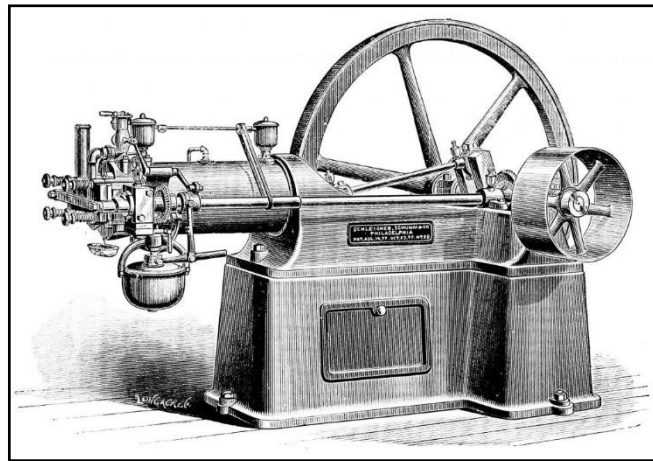


## 2. REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1. MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA CICLO OTTO - HISTÓRIA E DEFINIÇÃO

Segundo (Martins, 2005), por volta de 1860, o alemão Nikolaus Otto desenvolveu o primeiro motor a combustão interna de quatro tempos utilizando benzeno como combustível. Este motor de explosão trabalhava de forma teórica de acordo com o Ciclo Otto, desenvolvido pelo engenheiro para explicar o funcionamento do motor. Este primeiro motor foi desenvolvido para aplicações industriais, a apresentava muitas vantagens em relação aos motores à vapor utilizado na época.

Figura 2.1 – Motor a combustão interna Ciclo Otto 1876.



(Fonte: Martins, 2005)

O motor de combustão interna é a fonte de energia usada com mais frequência para automóveis. Os motores de combustão interna geram energia através da conversão de energia química contida no combustível em calor, e o calor produzido em trabalho mecânico. A conversão de energia química em calor se dá através da combustão, enquanto a conversão subsequente em trabalho mecânico é realizada, permitindo-se que a energia aumente a pressão dentro de um meio, que, então, realiza o trabalho na medida em que se expande, segundo (BOSCH, 2005).

Há dois tipos de processos de combustão que dominam as aplicações automotivas, denominados motores do ciclo Otto e motores do ciclo Diesel. Os motores de ciclo Otto são, primeiramente, caracterizados pela ignição na presença de uma centelha e com combustão a volume constante. Já o motor Diesel apresenta combustão espontânea a pressão constante, iniciada pelas altas pressões e temperaturas no interior do cilindro. Nos motores modernos,

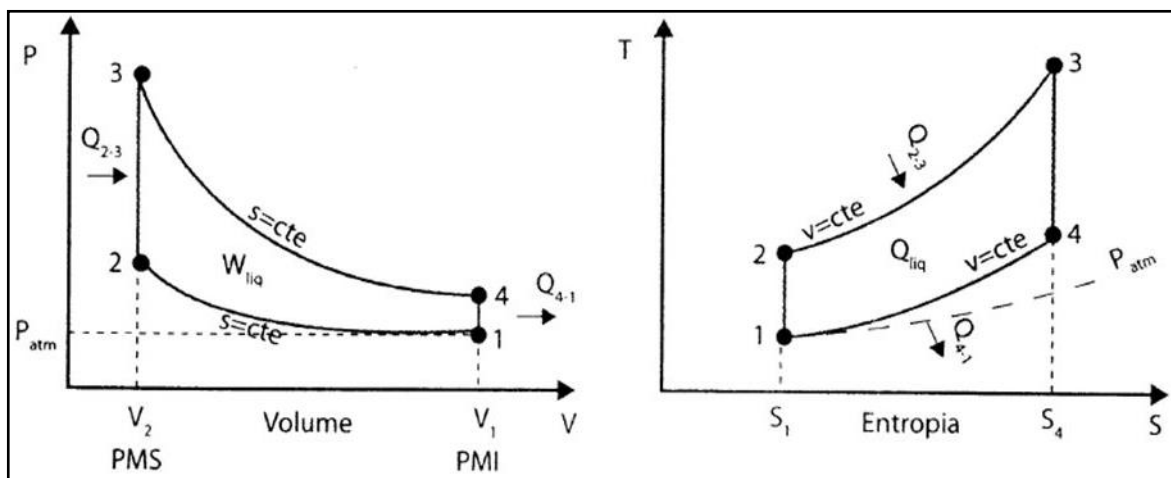
estas diferenciações não são mais tão explícitas devido à evolução da tecnologia dos motores. Sendo assim, estas classificações devem ser utilizadas mais como referências que ajudam o entendimento do funcionamento dos motores de combustão interna. Neste projeto, o objeto de estudo será o motor de combustão interna por centelha.

## 2.2. CLICO IDEAL DE TRABALHO DE UM MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA

Os ciclos de trabalho de um motor Ciclo Otto ideal são divididos em quatro processos separados em sequência: admissão, compressão, expansão e exaustão. Isto é um ciclo teórico ideal que serve de referência para um motor de combustão interna.

De acordo com (HEYWOOD, 1988), para analisar este ciclo, considera-se que somente ar, comportando-se como gás ideal, é admitido para dentro do cilindro. Os diagramas PV e TS são apresentados na Figura 2.2 e mostram as fases do ciclo Otto, composto por dois processos isovolumétricos e dois processos isentrópicos.

Figura 2.2 – (a) Diagrama PV (b) Diagrama TS para um Ciclo Otto



(Fonte: Heywood, 1988)

Em regime de trabalho com 100% de abertura de corpo de borboleta, os processos  $0 \rightarrow 1$  e  $1 \rightarrow 0$  no diagrama PV, representando os processos de admissão e exaustão, são desprezíveis. O processo  $1 \rightarrow 2$  representa a compressão isentrópica do ar quando o pistão se desloca do ponto morto inferior (PMI) para o ponto morto superior (PMS). Durante o processo  $2 \rightarrow 3$ , o calor é fornecido a volume constante. Este processo corresponde à ignição por centelha e à combustão no motor. Os processos  $3 \rightarrow 4$  e  $4 \rightarrow 1$  representam a expansão isentrópica e a rejeição de calor a volume constante, respectivamente, de acordo com (GANESAN, 1995).

As seguintes equações descrevem os ciclos de acordo com (FERGUSON, 1986):

0 → 1 – Admissão adiabática:

$$Q_{0 \rightarrow 1} = 0 \quad (2.1)$$

$$w_{0 \rightarrow 1} = P_0 \cdot (v_1 - v_0) \quad (2.2)$$

1 → 2 – Compressão isentrópica:

$$Q_{1 \rightarrow 2} = 0 \quad (2.3)$$

$$w_{1 \rightarrow 2} = C_v \cdot (T_2 - T_1) \quad (2.4)$$

2 → 3 – Adição de calor a volume constante:

$$Q_{2 \rightarrow 3} = Q_{in} = C_v \cdot (T_3 - T_2) \quad (2.5)$$

$$w_{2 \rightarrow 3} = 0 \quad (2.6)$$

3 → 4 – Expansão isentrópica:

$$Q_{3 \rightarrow 4} = 0 \quad (2.7)$$

$$w_{3 \rightarrow 4} = C_v \cdot (T_4 - T_3) \quad (2.8)$$

4 → 1 – Exaustão a volume constante:

$$Q_{4 \rightarrow 1} = Q_{out} = C_v \cdot (T_4 - T_1) \quad (2.9)$$

$$w_{4 \rightarrow 1} = 0 \quad (2.10)$$

1 → 0 – Exaustão a pressão constante:

$$Q_{1 \rightarrow 0} = 0 \quad (2.11)$$

$$w_{1 \rightarrow 0} = P_0 \cdot (v_0 - v_1) \quad (2.12)$$

Como é considerado um ciclo ideal, o trabalho realizado para injetar e retirar o fluido de trabalho é zero (trabalho de bombeamento):

$$w_{0 \rightarrow 1} + w_{1 \rightarrow 0} = P_0 \cdot (v_1 - v_0) + P_0 \cdot (v_0 - v_1) = 0 \quad (2.13)$$

### 2.3. PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DE UM MOTOR DE COMBUSTÃO

## INTERNA

O motor de combustão interna, que é objeto deste projeto, tem o seu ciclo de trabalho definido em quatro tempos, que são completos a cada 720 graus de rotação do virabrequim. Tais tempos de trabalho são descritos a seguir de acordo com (WILDER, 2004):

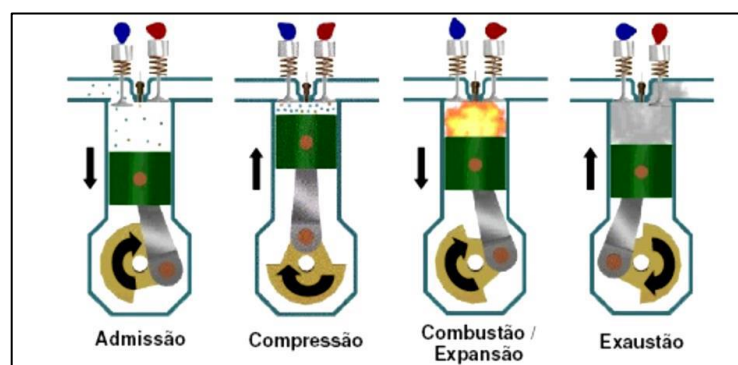
**Admissão:** Caracteriza-se pela entrada da mistura ar-combustível para a câmara de combustão através da válvula de admissão provocada pelo movimento do pistão do PMS (ponto morto superior) ao PMI (ponto morto inferior). Nessa etapa, a válvula de admissão permanece aberta e a de escapamento fechada;

**Compressão:** Com as válvulas fechadas, o pistão comprime a mistura ao se mover do PMI ao PMS. Pouco antes de chegar ao PMS, uma vela de ignição promove uma centelha elétrica, que provocará o início da combustão da mistura admitida na fase anterior, com conseqüente elevação da pressão;

**Combustão:** A queima da mistura provoca uma elevação da pressão no cilindro, o que promove o deslocamento do pistão para o PMI, realizando trabalho. Durante essa fase as válvulas permanecem fechadas. O tempo de expansão também é denominado de tempo motor;

**Exaustão:** em um deslocamento do PMI ao PMS com a válvula de escapamento aberta, o pistão expulsa os gases queimados do cilindro para a atmosfera.

Figura 2.3 – Quatro tempos de um motor de combustão interna



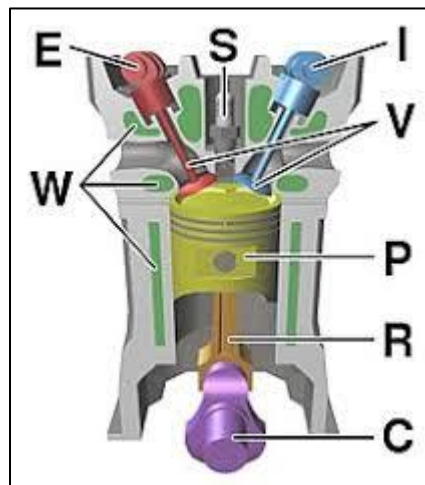
(Fonte: Baêta, 2006)

A figura 2.3 ilustra os quatro tempos de um ciclo de trabalho de um motor de combustão interna, demonstrando a cinemática dos componentes internos do motor, o pistão, biela e manivela.

## 2.4. COMPONENTES DE UM MOTOR A COMBUSTÃO INTERNA E SISTEMA DE ALIMENTAÇÃO DE COMBUSTÍVEL

Os componentes internos de um motor a combustão interna ciclo Otto tipicamente usado em automóveis de passeio são vistos na figura 2.4. O componente indicado como P é o pistão, que funciona como um êmbolo e é vedado no bloco do motor pelos anéis de segmento. A peça R é a biela, tem a função de conectar o pistão P à manivela C, tal conjunto transforma o movimento linear de subida e descida do pistão em um movimento rotacional no eixo da manivela.

Figura 2.4 – Componentes interno MCI



(Fonte: Revista Techspeed, 2018)

Na parte superior da figura 2.4 o componente indicado por S é a vela de ignição, responsável por iniciar a combustão dentro do cilindro. V são as válvulas de admissão (azul) e escape (vermelho), que são controlados pelos comandos de válvulas E para escape e I para admissão.

Componentes externos ao bloco e cabeçote do motor também são importantes para o funcionamento do mesmo, estes componentes passaram por muitas mudanças de design ao longo dos anos resultando em grandes aumentos na eficiência dos MCI, tais componentes são citados abaixo conforme (BRUNETTI, 2012):

**Coletor de admissão:** Responsável por transportar o ar da atmosfera para os dutos de válvulas de admissão, no caso de motores com injeção indireta de combustível é feita a mistura de ar e combustível neste espaço. O design deste componente influencia muito nas

características de trabalho do motor, dependendo do volume total, formato, comprimento e fluidez para determinar parâmetros de performance.

**Coletor de gases de escapamento:** Responsável por transportar os gases resultantes da combustão para a atmosfera. Seu design influi no quão rápido os gases de combustão sairão da câmara de combustão.

**Tanque de combustível:** É responsável por armazenar o combustível que alimenta o motor, geralmente é posicionado no eixo oposto ao do motor. Modelos comuns possuem sistema de retorno de combustível não utilizado pelo motor e são construídos de plástico. Veículos mais antigos possuem tanques de aço, porém havia problema de corrosão a longo prazo. Veículos de competição possuem tanque fabricado em alumínio, e são projetados para evitar a movimentação do combustível no tanque e manter a bomba de combustível sempre mergulhada.

**Bomba de combustível:** Tem a função de bombear o combustível que será utilizado pelo motor. Em veículos com sistema de carburação, esta bomba funciona mecanicamente, sendo acionada pelo motor, criando um vácuo na linha de combustível para sugá-lo. Em veículos com injeção eletrônica indireta, a bomba de combustível é elétrica e fica mergulhada no tanque de combustível ou acoplada a linha de combustível, fornece a vazão necessária para alimentar o que o motor necessita para funcionar com o seu desempenho máximo. Existem três tipos de bomba de combustível elétrica: de engrenagem, de roletes e centrífuga.

**Filtro de combustível:** É responsável por filtrar partículas estranhas na linha de combustível, protege a membrana do regulador de pressão de combustível e principalmente mantém as válvulas injetoras livres de sujeira que possam impedir seu funcionamento. Suas especificações são importantes para o correto funcionamento do sistema, é projetada para atender os valores de vazão com perda de carga mínima.

**Regulador de pressão de combustível:** Pode ser integrado à bomba de combustível em sistemas sem retorno ou na flauta de combustível após os bicos injetores com retorno de combustível para o tanque. É responsável por manter a pressão de combustível aos valores especificados para o correto funcionamento dos injetores, geralmente a valores entre 3,0 e 4,0 bar. Funciona com um sistema de mola e membrana, controlada pela pressão no coletor de admissão. A pressão varia de acordo com a carga no motor, pois o sistema exige pressão de combustível maior em faixas de eficiência volumétrica maior.

**Válvulas injetoras de combustível:** Esta válvula é responsável por injetar combustível nos cilindros. Suas principais características são: Vazão, pressão de trabalho e formato de leque de combustível. A vazão é dimensionada de acordo com a potência que cada cilindro do motor irá gerar, a pressão de trabalho é especificada para a pulverização do combustível, isto depende do tipo de combustível e características físicas do injetor, como os orifícios de saída. O formato do leque é importante para direcionar o *spray* de combustível diretamente para a(s) válvula(s) de admissão.

## 2.5. SISTEMA DE CONTROLE POR MALHA ABERTA

“Os chamados sistemas de controle de malha aberta são aqueles em que o sinal de saída não exerce nenhuma ação de controle no sistema. Isso quer dizer que, em um sistema de controle de malha aberta, o sinal de saída não é medido nem realimentado para comparação com a entrada. Um exemplo prático é o da máquina de lavar roupas. As operações de colocar de molho, lavar e enxaguar em uma lavadora são executadas em uma sequência baseada em tempo. A lavadora não mede o sinal de saída, isto é, não verifica se as roupas estão bem lavadas.” (OGATA, 2010).

Em um sistema de alimentação de combustível por carburação ou em injeções eletrônicas mais antigas utiliza-se este tipo de sistema, pois o carburador ou o ECU não mede o resultado da queima de combustível para corrigir a quantidade de combustível admitida pelo motor.

## 2.6. SISTEMA DE CONTROLE POR MALHA FECHADA

“Os sistemas de controle com realimentação são, com frequência, denominados também sistemas de controle de malha fechada. Na prática, os termos controle com realimentação e controle de malha fechada são usados indistintamente. Em um sistema de controle de malha fechada, o sinal de erro atuante, que é a diferença entre o sinal de entrada e o sinal de realimentação (que pode ser o próprio sinal de saída ou uma função do sinal de saída e suas derivadas e/ou integrais), realimenta o controlador, de modo a minimizar o erro e acertar a saída do sistema ao valor desejado. O termo ‘controle de malha fechada’ sempre implica a utilização do controle com realimentação para reduzir o erro do sistema.” (OGATA, 2010).

Injeções eletrônicas modernas utilizam este tipo de sistema de controle para corrigir e manter valores de mistura ar/combustível ao que foi programado. Utiliza-se sensor de oxigênio

para aferir o resultado da combustão no motor, obtendo este sinal como erro atuante. Assim corrige-se os valores de tempo de injeção a fim de obter a mistura ar/combustível ideal.

## 2.7. FUNCIONAMENTO DE UM SISTEMA DE INJEÇÃO ELETRÔNICA

Segundo (BOSCH, 2005), o sistema de injeção eletrônica é responsável basicamente por controlar a mistura de ar e combustível para um motor de combustão interna. Junto a isso controla o avanço de ponto de ignição necessário para o motor em determinado regime. Todo o sistema é controlado pelo ECU (*Engine Control Unit*), o qual é um computador que receber sinais de sensores (entradas), processa os dados recebidos, consulta as informações programadas e aciona os atuadores (saída). Funciona como um sistema de controle por malha fechada.

De acordo com (FUELTECH, 2018), os sensores que fornecem entradas de dados para o ECU são responsáveis pela precisão deste sistema, são os sensores de temperatura (de líquido de arrefecimento do motor, temperatura ambiente e temperatura no coletor de admissão), sensor de fluxo de ar, sensor de pressão na admissão, sensor de posição de corpo de borboleta, sensor de posição de pedal de acelerador, sensor de detonação, sensor de rotação do motor, sensor de fase de comando de válvulas e sonda lambda. “São componentes eletrônicos responsáveis por transformar parâmetros físicos do funcionamento do motor, como pressão, temperatura e rotação, em sinais elétricos que serão lidos pela unidade de comando.” (BOSCH, 2014)

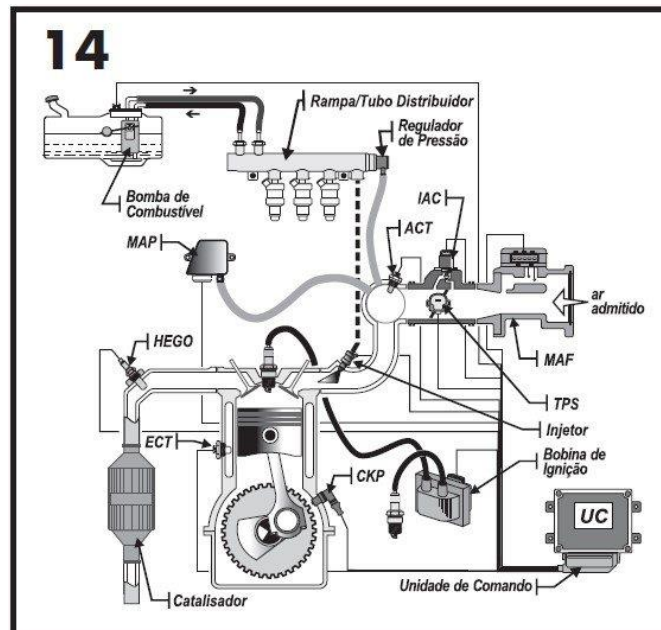
Os atuadores recebem sinais processados pelo ECU para manter o funcionamento do motor, são responsáveis por misturar combustível com ar de admissão com as válvulas injetoras, de acionar a faísca de ignição com as bobinas de ignição e velas, controlar o atuador de marcha lenta para manter o funcionamento suave quando o motor estiver em sua rotação mínima. “São componentes controlados pelos sinais enviados pela unidade de comando, mantendo o motor em funcionamento nas melhores condições possíveis.” (BOSCH, 2014)

O perfeito funcionamento dos sensores e atuadores garante o rendimento térmico do motor de forma otimizada, sua eficiência, mantém níveis de emissões de gases poluentes baixos, economia de combustível e suavidade no funcionamento.

O ECU controla basicamente dois parâmetros principais que são vitais para o correto funcionamento do motor, que é o tempo de injeção de combustível e avanço de ponto de ignição. Estes parâmetros são gravados como “mapas” na memória do ECU, armazenados em formas de tabelas ou matrizes.



Figura 2.5 – Sistema de injeção eletrônica por malha fechada



(Fonte: MTE-Thompson, 2019)

“Mapas nada mais são do que a formação de parâmetros de funcionamento do motor de acordo com a programação efetuado pelo ‘tuner’. Existem dois tipos de ‘mapas’, os de 2D e 3D. Os mapas 2D são mais fáceis de serem implantados inserindo informações na programação de cada setor do sistema de gerenciamento. Já os mapas 3D são mais complexos - e melhores depois que você adquire experiência, pois você consegue verificar toda a formação de parâmetros em diversas escalas, em graus, de acordo com o fabricante do equipamento” (LIMA, 2017).

## 2.8. DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA DE ALIMENTAÇÃO DE COMBUSTÍVEL

Neste estudo não há o interesse em calcular a potência teórica do motor estudado, pois este irá diferir significativamente para menos em relação ao resultado real medido em dinamômetro. O motor M50TUB25 apresenta avanços tecnológicos que aumentam a eficiência do motor (bobinas individuais, variação de fase de comando de válvulas, balanceamento de componentes internos otimizado e em relação a um cálculo teórico como o de Brunetti, Ferguson, Ganesan ou Heywood. Então, neste trabalho será considerado a potência alvo ( $P_a$ ), que é a potência que se deseja chegar ao fazer melhorias. Isto resultará em um sistema de combustível que alimentará o motor com segurança. Este método de cálculo é de acordo com (LIMA, 2017).

“Bombas são complexas, o cálculo de vazão e pressão de trabalho devem ser perfeitos para que o motor receba a alimentação de forma estável e segura. O correto é escolher o volume da bomba de combustível de acordo com a potência do motor e combustível utilizado, verificando também a voltagem e pressão a qual a bomba foi aferida com o volume descrito.” (LIMA, 2017)

O método de cálculo para vazão de bomba de combustível e de bicos injetores utiliza a mesma equação, considerando dois fatores como explicado na equação 2.14, conforme (LIMA, 2017).

$$Vazão = \frac{P_a \times BSFC \times Comb.}{N \times F.S.} \quad (2.14) \text{ onde:}$$

- $P_a$  = Potência alvo em hp;
- $BSFC$  = Brake Specific Fuel Consumption (Fator de quantidade de combustível utilizada por cavalo vapor/hora). Para motores naturalmente aspirado se utiliza 0,5; para motores sobrealimentados se utiliza 0,6. (BRUNETTI, 2012)
- $Comb.$  = Fator de tipo de combustível considerando poder calorífico. Gasolina 1,0; Etanol = 1,4; Metanol = 2,1. (LIMA, 2017)
- $N$  = Número de bicos injetores ou de bomba de combustível.
- $F.S.$  = Fator de segurança, geralmente utiliza-se 0,8, considerando que o sistema trabalhará no máximo a 80% de sua capacidade. (LIMA, 2017)

Este cálculo de leva em consideração uma aplicação de tensão contínua de 12 volts e pressão de trabalho 3,0 bar.

## 2.9. MAPEAMENTO E MÉTODO DE INJEÇÃO DE COMBUSTÍVEL

No caso do mapa de injeção de combustível, os valores armazenados são de tempo de injeção de combustível, em unidades de milissegundos. De acordo com (FUELTECH, 2018), este tempo de injeção determina o tempo total que as válvulas injetoras de combustível ficarão abertas em cada ciclo. Um tempo maior de injeção significa que o motor irá admitir mais combustível.

Na figura 2.4 observa-se um exemplo de mapa de tempo de injeção simplificado criado pelo autor em relação pressão no coletor de admissão em bar (lida pelo sensor MAP). O motor

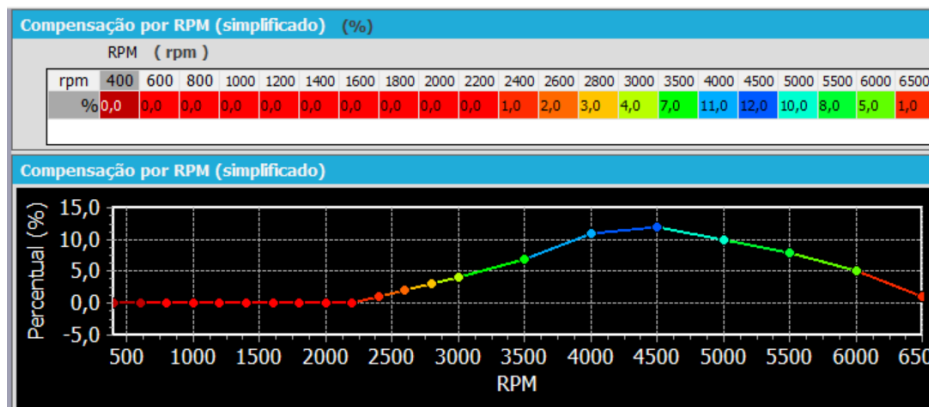
deste exemplo é sobrealimentado com turbo compressor, e trabalha em regime de vácuo (fase aspirada de -1,00 a 0,00 bar) e regime de pressão positiva (fase sobrealimentada de 0,01 a 1,20 bar). Em conjunto com este mapa há a correção de injeção de combustível por rotação de motor, vide figura 2.5. Neste gráfico a correção ocorre apenas a partir de 2400rpm, pois é onde o motor ganha eficiência volumétrica e necessita de mais combustível, a curva desce a partir de 4500rpm pois o tempo de abertura das válvulas de admissão se torna baixo e o motor perde eficiência volumétrica. A figura 2.6 exemplifica a matriz resultante dos dois gráficos simplificados, o mapa em 3D.

Figura 2.4 – Mapa principal de injeção (2D)



(Fonte: Autoria própria, software FTManager® V4.11, 2019)

Figura 2.5 – Compensação por RPM (2D)



(Fonte: Autoria própria, software FTManager® V4.11, 2019)

Figura 2.6 – Tabela de injeção MAP x RPM

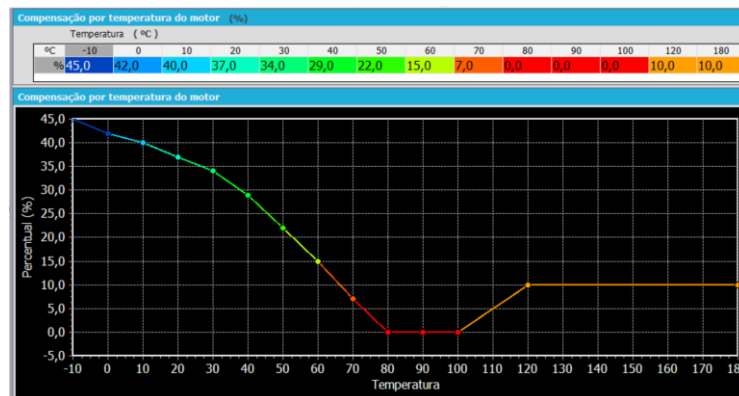
Tabela de injeção MAP x RPM - Bancada A (avançado) (ms)		RPM ( rpm )																				
		400	600	800	1000	1200	1400	1600	1800	2000	2200	2400	2600	2800	3000	3500	4000	4500	5000	5500	6000	6500
MAP ( bar )	1,20	18,462	18,462	18,462	18,462	18,462	18,462	18,462	18,462	18,462	18,462	18,637	18,811	18,986	19,160	19,694	20,383	20,557	20,208	19,859	19,335	18,637
	1,00	17,169	17,169	17,169	17,169	17,169	17,169	17,169	17,169	17,169	17,169	17,331	17,492	17,654	17,816	18,301	18,948	19,109	18,786	18,463	17,977	17,331
	0,80	15,877	15,877	15,877	15,877	15,877	15,877	15,877	15,877	15,877	15,877	16,026	16,175	16,323	16,472	16,918	17,513	17,662	17,365	17,067	16,621	16,026
	0,60	14,585	14,585	14,585	14,585	14,585	14,585	14,585	14,585	14,585	14,585	14,721	14,857	14,993	15,128	15,536	16,079	16,215	15,944	15,672	15,264	14,721
	0,40	13,292	13,292	13,292	13,292	13,292	13,292	13,292	13,292	13,292	13,292	13,415	13,538	13,661	13,784	14,152	14,644	14,767	14,521	14,275	13,907	13,415
	0,20	12,000	12,000	12,000	12,000	12,000	12,000	12,000	12,000	12,000	12,000	12,110	12,220	12,330	12,440	12,770	13,210	13,320	13,100	12,880	12,550	12,110
	0,00	10,708	10,708	10,708	10,708	10,708	10,708	10,708	10,708	10,708	10,708	10,805	10,902	10,999	11,096	11,388	11,776	11,873	11,679	11,485	11,193	10,805
	-0,10	10,062	10,062	10,062	10,062	10,062	10,062	10,062	10,062	10,062	10,062	10,153	10,243	10,334	10,424	10,696	11,059	11,149	10,968	10,787	10,515	10,153
	-0,20	9,415	9,415	9,415	9,415	9,415	9,415	9,415	9,415	9,415	9,415	9,499	9,583	9,667	9,752	10,004	10,341	10,425	10,257	10,088	9,836	9,499
	-0,30	8,769	8,769	8,769	8,769	8,769	8,769	8,769	8,769	8,769	8,769	8,847	8,924	9,002	9,080	9,313	9,624	9,701	9,546	9,391	9,157	8,847
	-0,40	8,123	8,123	8,123	8,123	8,123	8,123	8,123	8,123	8,123	8,123	8,194	8,265	8,337	8,408	8,622	8,907	8,978	8,835	8,693	8,479	8,194
	-0,50	7,477	7,477	7,477	7,477	7,477	7,477	7,477	7,477	7,477	7,477	7,542	7,607	7,671	7,736	7,830	8,109	8,254	8,125	7,995	7,801	7,542
-0,60	6,831	6,831	6,831	6,831	6,831	6,831	6,831	6,831	6,831	6,831	6,889	6,948	7,006	7,064	7,239	7,472	7,531	7,414	7,297	7,123	6,889	
-0,70	6,831	6,831	6,831	6,831	6,831	6,831	6,831	6,831	6,831	6,831	6,889	6,948	7,006	7,064	7,239	7,472	7,531	7,414	7,297	7,123	6,889	
-0,80	6,831	6,831	6,831	6,831	6,831	6,831	6,831	6,831	6,831	6,831	6,889	6,948	7,006	7,064	7,239	7,472	7,531	7,414	7,297	7,123	6,889	
-0,90	6,831	6,831	6,831	6,831	6,831	6,831	6,831	6,831	6,831	6,831	6,889	6,948	7,006	7,064	7,239	7,472	7,531	7,414	7,297	7,123	6,889	
-1,00	6,831	6,831	6,831	6,831	6,831	6,831	6,831	6,831	6,831	6,831	6,889	6,948	7,006	7,064	7,239	7,472	7,531	7,414	7,297	7,123	6,889	

(Fonte: Autoria própria, software FTManager® V4.11, 2019)

Além dos mapas principais de injeção, existem as correções de injeção de acordo com os vários regimes de funcionamento em que o motor pode se encontrar, que varia principalmente em razão de temperaturas.

A figura 2.7 exemplifica uma curva comum de correção de injeção por temperatura de motor. “A temperatura do motor exerce grande influência na quantidade de combustível solicitada pelo motor, principalmente em carros a álcool e metanol onde se consegue fazer funcionar um motor frio como se já estivesse na temperatura normal.” (LIMA, 2017).

Figura 2.7 – Compensação por temperatura de motor.



(Fonte: Autoria própria, Software FTManager® V4.11, 2019)

“Temperatura do ar colocado no coletor de admissão do motor serve para adaptar automaticamente a injeção às diferentes temperaturas do ar admitidas pelo motor. Para motor turbo é de grande importância esta compensação, pois instantaneamente quando o sistema é pressurizado, a temperatura do ar admitido sobe a valores muito altos.” (LIMA, 2017).

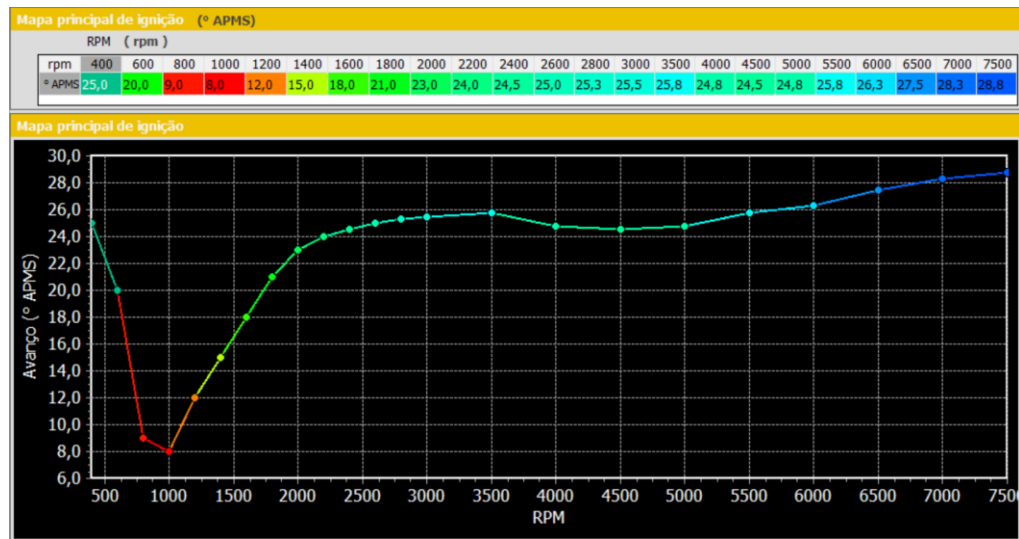
Segundo (Wilder, 2004), quando o motor opera em temperatura mais baixas, principalmente quando o ar admitida é menor, pode-se explorar um pouco o aumento da densidade do ar para obter-se mais potência, isto ocorre se houver uma mistura um pouco mais rica do que em condições normais, pois a densidade do ar no coletor de admissão é maior e quando houver explosão da mistura na câmara de combustão, a expansão desde gás é mais significativa.

#### 2.10. MÉTODO DE IGNIÇÃO DE MAPEAMENTO DE AVANÇO DE IGNIÇÃO

Segundo (HEYWOOD, 1988), a ignição ou arco elétrico que ocorre entre os eletrodos da vela de ignição é o ato que determina o início de uma reação química chamada combustão entre 3 elementos, ar, combustível e fonte de calor (ignição). A frente de chama dentro do cilindro teoricamente, tem uma propagação esférica como uma bolha, mas na prática tem uma forma irregular e pode variar de ciclo para ciclo.

A alteração do ponto onde ocorrerá a ignição influencia diretamente na eficácia desta frente de chamas. Para que esta energia seja aproveitada da melhor forma, escolhe-se o ponto exato onde a frente de chamas irá concentrar-se em empurrar o pistão para baixo, quando o pistão já passou do ponto morto superior e prossegue ao ponto morto inferior, este ponto ocorre aproximadamente entre 13° e 15°. O avanço do ponto de ignição é dado em graus de giro do motor após o ponto morto superior ou antes do ponto morto superior. Observe a figura 2.8, este é o mapa principal para controle do avanço do ponto de ignição no motor BMW a gasolina, e é baseado na velocidade de rotação do motor. À medida que a velocidade do motor aumenta, o avanço de ponto de ignição aumenta, até um certo limite, e então quando atinge a região de alta eficiência volumétrica, o avanço de ponto de ignição diminui, para permitir que o motor desenvolva mais velocidade. Este avanço volta a aumentar quando a eficiência volumétrica volta a cair quando está em altas rotações, justamente para compensar a perda de eficiência.

Figura 2.8 – Mapa principal de ignição motor BMW gasolina 87 octanas.



(Fonte: Autoria própria, Software FTManager® V4.11, 2019)

Este avanço de ponte de ignição pode ser ajustado por outros parâmetros de funcionamento do motor, como pressão no coletor de admissão, temperatura do motor e temperatura do ar.

### 3. METODOLOGIA

#### 3.1. MÉTODOS

Adota-se um método experimental científico para observar o comportamento de determinadas variáveis dependentes no sistema de controle para coleta de dados.

Segundo Prodanov e Freitas (2013, p. 37) “O método experimental consiste, especialmente, em submeter os objetos de estudo à influência de certas variáveis, em condições controladas e conhecidas pelo investigador, para observar os resultados que a variável produz no objeto (GIL, 2008). Não seria exagero considerar que parte significativa dos conhecimentos obtidos nos últimos três séculos se deve ao emprego do método experimental, que pode ser considerado como o método por excelência das ciências naturais.”

Os métodos experimentais são iniciados com testes do motor M50TUB25 ainda com seu sistema de injeção eletrônica original. Será instalado no sistema de escapamento uma sonda lambda de banda larga para medir a mistura dos gases de escapamento por fator Lambda. Considera-se uma mistura pobre de ar e combustível quando o fator lambda é maior que o valor 1 (possui excesso de oxigênio), mistura rica com fator menor que 1 (possui excesso de combustível) e mistura estequiométrica quando o fator é igual a 1.

Com a sonda lambda de banda larga instalada, o veículo será testado em dinamômetro de rolos, adquirindo dados de sonda lambda em várias faixas de rotações, diferentes cargas aplicadas ao motor e medição de potência e torque gerado.

Conforme Lakatos e Marconi, (2007, p. 141) “Na questão fundamental de saber, numa relação, qual a variável independente (determinante) e qual a dependente (determinada), parece impor-se, pela lógica, o critério de suscetibilidade à influência, ou seja, seria dependente aquela variável capaz de ser alterada, influenciada ou determinada pela outra, que passaria, então, a ser considerada a independente ou causal.”

Conforme Lakatos e Marconi (2003, p.138) “Em uma pesquisa, a variável independente é o antecedente e a variável dependente é o conseqüente. Os cientistas fazem predições a partir de variáveis independentes para variáveis dependentes; quando, ao contrário, querem explicar um fato ou fenômeno encontrado - variável dependente - procuram a causa - variável independente.”

Serão coletados dados de sonda com o motor em diversas situações, temperaturas de motor diferentes, temperaturas de ar diferentes e cargas de motor diferente, isto apontará de

forma experimental o quando o valor de mistura ar combustível é dependente do destes fatores. Todos estes testes serão feitos com a injeção original e injeção programável.

### 3.2. TÉCNICAS

Segundo Lakatos e Marconi, (2003, p. 155) “A pesquisa, portanto, é um procedimento formal, com método de pensamento reflexivo, que requer um tratamento científico e se constitui no caminho para conhecer a realidade ou para descobrir verdades parciais.”

Esta filosofia de pesquisa está sendo usada para definir o melhor sistema de injeção programável para o motor estudado, de acordo com suas características de software, tipo de injeção de combustível disponível, tipo de ignição, recursos de entrada e saída e recursos de correções de injeção e ignição.

Uma técnica importante é a de análise de incertezas de medição. Nas primeiras medições feitas com o sistema de injeção original, é realizado uma análise de incerteza dos sensores de temperatura e humidade do dinamômetro, incerteza da medição do fator lambda da sonda Bosch LSU 4.2 e incerteza de medição de torque e potência de dinamômetro.

Com os sistemas de injeção eletrônica programável, todos os parâmetros de injeção serão coletados para leituras de logs do funcionamento do motor. Esta análise de incerteza será mais complexa, pois todos os sensores da injeção serão computados para serem classificadas como variáveis dependentes e independentes.

### 3.3. PROCEDIMENTOS

Inicia-se este projeto com a pesquisa sobre o funcionamento do sistema de injeção eletrônica original do veículo, buscando em manuais técnicos de manutenção e catálogo de fabricantes dos componentes sobre o funcionamento e função de cada elemento deste sistema complexo.

Estuda-se o diagrama elétrico do sistema de injeção eletrônica para compreender os métodos de controles de atuadores do motor, como método de injeção, método de ignição, acionamento de bomba de combustível e controle de atuadores de comando variável.

Antes da realização dos ensaios com o sistema de injeção original será feito a instrumentação do veículo. Inicialmente esta instrumentação é a instalação de uma sonda lambda de banda larga com módulo condicionador de sinal. A sonda lambda de banda larga



utilizada é a de modelo Bosch LSU 4.2, pelo seu custo benefício e por ser facilmente encontrada no mercado. O módulo condicionador de sonda será escolhido de acordo com a injeção eletrônica programável que será instalada, este serve para converter o sinal de sonda em V para valores equivalentes de lambda.

O sistema de alimentação de combustível será dimensionado de acordo com os métodos encontrados na literatura para a mudança de combustível de gasolina para etanol, considerando o aumento de potência e fatores de segurança apropriados para cada componente.

Após concluídos estudos sobre o sistema de injeção original, busca-se no mercado o sistema controlador de injeção eletrônica que melhor se adequa o projeto. Será considerado, analisando fichas técnicas disponíveis no mercado, a capacidade do sistema de controlar todos os sensores e atuadores do motor, custo-benefício do sistema, vantagens de funções extras e possibilidade de futuras melhorias para o projeto.

Quando selecionado o sistema utilizado, o software programador do controlador será estudado para iniciar a programação e configuração de entradas e saídas necessárias para controlar o motor. Cria-se então os mapas de injeção e ignição para funcionamento do motor, configura-se parâmetros de marcha lenta, compensações de injeção e ignição de acordo com leitura de sensores e mapa de alvos para leitura de sonda lambda.

A instalação do módulo de injeção eletrônica será projetado de acordo com o manual da fabricante, já preparando a alimentação de combustível para utilizar etanol. Uma vez concluído a instalação, é configurado o módulo de acordo com as características do motor, como quantidade e vazão de injetores, tipo de injeção, quantidade de bobinas, tipo de ignição, tipos de sensores, tipo de atuadores, tipo de combustível e taxa de compressão estática do motor. Feito isto é gerado um mapa de injeção e ignição base para dar a primeira partida do motor, em seguida feito a calibração fina de mistura de combustível e avanço de ignição.

## 4. ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS

A análise de resultados deste projeto inicia ao dimensionar o sistema de alimentação de combustível considerando a conversão de gasolina para etanol, pois há a necessidade de troca de componentes para adequar-se às propriedades físico-químicas do álcool e novos valores de vazão do combustível considerando o aumento de potência futuro. A potência alvo considerada neste será de 270hp no eixo do motor.

### 4.1. DIMENSIONAMENTO DE COMPONENTES DE SISTEMA DE ALIMENTAÇÃO DE COMBUSTÍVEL

A primeira análise a ser feita para a conversão do combustível de gasolina para etanol é relacionada à resistência dos materiais à corrosão que o etanol provoca. A indústria automotiva mundial e principalmente a brasileira já desenvolveu peças automotivas com materiais que resistam à corrosão provocada pelo etanol.

As primeiras modificações que se notou na indústria foi a utilização de tanques de combustíveis com materiais plásticos, como PEAD (Polietileno de Alta Densidade) e PA (Poliamida). Estes substituíram os tanques de aço, que apresentaram um alto grau de corrosão quando em contato prolongado com o etanol. Outros componentes também foram modificados, como linha de combustível, bomba de combustível, filtro e bicos injetores.

Cada fabricante de componentes de injeção eletrônica específica em seus catálogos informações técnicas de aplicação de tipo de combustível. No caso deste projeto, as informações mais importantes a serem extraídas do catálogo para o dimensionamento do sistema são: Vazão, tipo de combustível, compatibilidade do sistema elétrico e compatibilidade de dimensões.

Algo importante a se levar em consideração no sistema de injeção de combustível é a pressão de trabalho do regulador de pressão. Originalmente o motor BMW M50 utiliza um regulador de pressão Bosch com número de referência 0 280 160 597, segundo o catálogo (BOSCH, 2010). Este regulador trabalha com sistema de retorno para o tanque de combustível, e é instalado na flauta de injetores, com pressão de trabalho de 3.5 bar.

Figura 4.1 – Regulador de pressão 0 280 160 597 3,5 bar



(Fonte: Catálogo Bosch 2010)

#### 4.1.1. VÁLVULAS INJETORAS DE COMBUSTÍVEL

O sistema de injeção original aplicado no motor M50B25/TU utiliza injetores Bosch com referência 0 280 150 415, e é especificado para uso apenas de gasolina. Considerando a potência específica por cilindro deste motor, que seria a divisão de 192 hp por 6 cilindros, resultando em 32 hp, estes injetores são dimensionados perfeitamente para a potência original. Seguindo método de cálculo da equação 2.14, compara-se o resultado dos cálculos com o encontrado no catálogo e apresentado na tabela 4.1.

$$Vazão = \frac{32 \times 0,5 \times 1,0}{1 \times 1,0} = 16 \text{ lbs/h (168 cc/min)}$$

Figura 4.1 – Válvula injetora de combustível 0 280 150 415.



(Fonte: Catálogo Bosch 2010)

Tabela 4.1 - Tabela comparativa injetores Bosch

Número de Referência	Veículo de aplicação	Impedância (Ohms)	Vazão a 3 bar (lb/h)	Tipo de jato	Tipo de conector	Combustível permitido
0280150415	BMW M50B25/TU	15,90	16,76	Spray 4 furos	Bosch EV1	Gasolina
0280155968	Volvo S60/C70/V70 Turbo	14,00	42,00	Spray 4 furos	Bosch EV1	E85 (85% etanol, 15% gasolina)
0280156086	GM Astra 2.0 Flex	12,00	28,12	Spray 4 furos	Bosch EV6	E100 (100% etanol)

(Fonte: Autoria própria com dados retirados do catálogo Bosch 2010)

Este cálculo é muito aproximado do valor visto na tabela 4.1. Observe que foi considerado na calibração original que o ciclo de trabalho máximo dos injetores em pico de potência (máxima eficiência volumétrica) é de 100%, pois a calibração de injeção original busca exatamente este valor de potência para todos os veículos que foram produzidos. Diferente de quando um motor é preparado para o máximo de performance, utiliza-se sempre um fator de segurança (ou ciclo de trabalho máximo desejado para a potência alvo) de 80%, pois há a possibilidade de aumento de potência em determinadas situações.

Um dos problemas citados na introdução deste trabalho era o fato deste motor perder potência com o uso da gasolina atual vendida em postos de combustíveis brasileiros, que possui de 22% a 28% de etanol em sua mistura. Observe que o cálculo feito pela BMW é muito preciso considerando gasolina pura, e segundo a ANP (como já citado no capítulo 2), o poder calorífico da gasolina pura é de **10.221 kcal/kg**, e do etanol é de **6.437 kcal/kg**, cerca de 37% menor.

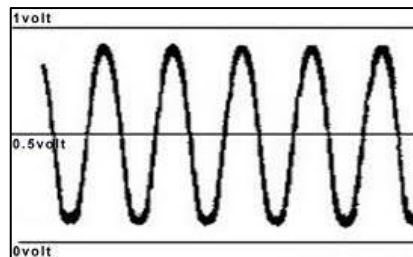
Dados as devidas proporções, a mistura da gasolina comum comercializada possui em média um poder calorífico 10,20% menor que a gasolina pura. Ou seja, para o sistema de injeção original gerar a mesma potência que em sua calibração com gasolina pura, os injetores deveriam injetar um volume cerca de 10% maior que o calculado, porém os injetores Bosch originais poderiam injetar apenas 5% a mais, e chegariam no limite de sua capacidade. Ao fazer a leitura da queima deste combustível misturado, a sonda lambda poderá enviar sinais para o ECU injetar no máximo 5% a mais de combustível nas faixas de pico de potência. Isto gera um perca de potência comparado ao original e aumento no consumo de combustível em faixas de potência

média (onde geralmente o motor opera). Em resumo, o motor precisa queimar 10,20% a mais de combustível para gerar o mesmo número de potência comparado à gasolina pura.

Uma forma interessante de analisar este efeito da mistura da gasolina e etanol é observar os resultados de cálculo estequiométrico da mistura ar e combustível. Como já colocado no capítulo 2, os resultados de cálculo para a gasolina pura é de 14,7:1, ou seja, para atingir a estequiometria desta mistura, é necessário 14,7 partes de ar para uma parte de combustível. Com o etanol, que possui poder calorífico menor, este resultado é de 9:1. Com a gasolina comum comercializadas nos postos de gasolina brasileiros, o resultado é em média 13,2:1. Ou seja, utiliza-se mais combustível se comparado a gasolina pura para atingir a estequiometria.

De acordo com (Bosch, 2005), os sistemas de injeção de veículos de passeio buscam uma mistura estequiométrica quando em marcha lenta, ou seja, um fator lambda  $\lambda = 1$ . Sabe-se que é muito difícil manter este valor por longos intervalos de tempo (acima de 1 segundo), então o ECU faz sempre correções de acordo com a leitura do sensor de oxigênio para que a mistura ar-combustível se mantenha o mais próximo o possível destes valores. A figura 4.2 mostra um gráfico de sinal de sensor de lambda em um intervalo curto de tempo.

Figura 4.2 – Oscilação de sinal de sensor de oxigênio.



(Fonte: Revista Techspeed, 2018)

Como já mencionado no início deste capítulo, a potência alvo para o dimensionamento do sistema de injeção será de 270 hp no eixo do motor, considera-se um fator de trabalho máximo dos injetores de 80% e álcool como combustível. Com isto, resulta nos seguintes valores:

$$Vazão = \frac{270 \times 0,5 \times 1,4}{6 \times 0,80} = 39,375 \text{ lbs/h (413,437 cc/min)}$$

Com este valor buscou-se no catálogo de injetores Bosch uma peça que tenha semelhanças técnicas com o injetor original e vazão igual ou pouco superior ao calculado. Os fatores mais importantes para se analisar foram listados na tabela 4.1. A válvula injetora que

melhor atendeu estas exigências foi a de número 0 280 155 968. Observe que o tipo de conector elétrico e tipo de jato é igual à peça original. Diferindo no tipo de combustível (E85, o que atende para aplicação com uso de etanol) e impedância (que não fará diferença com o uso do ECU programável). Sua vazão aferida a 3 bar é 42 lbs/h (441 cc/min), apenas 6,25% maior que o calculado. O tempo de latência deste injetor é de 0,459 ms a 12 volts e 0,224ms a 14 volts, segundo dados do catálogo Bosch.

Os dois injetores possuem o mesmo diâmetro de encaixe na entrada e saída, e comprimento total semelhante, 77mm para os originais e 73mm para os novos. Isto foi compensado com uma leve modificação no suporte da flauta de combustível, que foi encurtado em 4mm.

Figura 4.3 – Válvula injetora de combustível 0 280 155 968.




(Fonte: Catálogo Bosch 2010)

Este injetor é facilmente encontrado no mercado de autopeças brasileiro, e amplamente utilizado em veículos com preparação de motor para aumento de potência utilizando etanol. Foi adquirido 6 injetores pelo valor de R\$ 366,00. Um ótimo custo benefício comparado aos injetores originais, cada peça custa R\$ 150,00.

#### 4.1.2. BOMBA DE COMBUSTÍVEL

A bomba de combustível de especificação original para o motor M50TUB25 é feita pela Bosch com número de referência 0 580 314 076, segundo o catálogo (Bosch, 2010), esta é especificada para uso de gasolina, com vazão de 120 L/h a 3,0 bar. Esta peça é foi dimensionada para atender diversos modelos de veículos da BMW como visto na figura 4.4, com potências superiores a 280 hp, quase 100 hp a mais que no motor M50.

Figura 4.4 – Aplicação bomba de combustível Bosch 0 580 314 076.

<b>0 580 314 076</b>		<b>3,0 bar</b>	<b>120 l/h</b>		
	BMW	316 i, 318 i, 320 i, 325 i	09.90 → 01.95	16 141 182 842	Substitui/Sustituye: 0 580 453 053
		318 i Cabrio	02.95 → 12.99		
		318 is	03.93 → 12.96		
		323 i	10.94 → 12.98		
		325 i Cabrio	03.93 → 12.95		
		328 i	10.94 → 12.98		
		M 3 Cabrio	01.94 → 12.95		
		M 3 Coupe	09.92 → 09.95		
		318 is	02.95 → 12.98	16 146 758 736	
		323 i Coupe / Touring, 328 i Cabrio / Touring	02.95 → 06.99		

(Fonte: Bosch 2010)

Teoricamente esta bomba de combustível elétrica atenderia o projeto se o combustível utilizado fosse gasolina, porém o não resiste ao uso de etanol. Manipulando a equação 2.14 para encontrar a Potência alvo para que a bomba foi dimensionada encontra-se:

$$P_a = \frac{Vazão \times N \times F.S.}{BSFC \times Comb.} \quad (4.1)$$

Convertendo o valor de vazão 120 L/h para a unidade usada na equação, tem-se aproximadamente 190 lbs/h. A potência alvo para o qual a bomba de combustível foi projetada é:

$$P_a = \frac{190 \times 1 \times 0,8}{0,5 \times 1,0} = 304 \text{ hp}$$

Se o combustível utilizado fosse etanol, o fator de combustível precisa ser modificado para 1,4, o que não atenderia a potência alvo no etanol:

$$P_a = \frac{190 \times 1 \times 0,8}{0,5 \times 1,4} = 217 \text{ hp}$$

O valor da bomba de combustível original no mercado de autopeças brasileira é em média de R\$ 845,00 segundo pesquisas feitas pelo autor. Pesquisando no catálogo de uma fabricante de bombas de combustível para veículos preparados (Dinâmica bombas), foi encontrado uma peça fabricada para uso de gasolina, etanol e metanol, com vazão medida a 3,0 bar de 180 L/h (aproximadamente 285 lbs/h), o que certamente atende o projeto. O valor pago por esta peça foi de R\$ 220,00. Calculando a potência que essa bomba alimenta com etanol a 3,0 bar, tem-se:

$$P_a = \frac{285 \times 1 \times 0,8}{0,5 \times 1,4} = 325 \text{ hp}$$

Mesmo consideram que a bomba irá trabalhar no máximo a 80% de sua capacidade, o valor encontrado é quase 17% maior que a potência alvo determinada para o projeto, podendo alimentar a linha de combustível caso haja futuras modificações no motor para aumento de potência.

## 4.2. COMPONENTES DE SISTEMA DE IGNIÇÃO

### 4.2.1. BOBINAS DE IGNIÇÃO

Este motor possui sistema de ignição sequencial, com bobinas individuais para cada cilindro. É fabricado pela Bosch e tem número de referência 0 221 504 474. Sua tensão nominal é de 14.000V e não possui módulo amplificador interno, de 12v para 14.000V, pois o conector de padrão SAE possui 3 pinos, um aterramento, um sinal de pós-chave e a saída de ignição, que é alimentada de uma saída individual da ECU.

Este módulo amplificador é integrado ao ECU, e isto gera calor dentro da central. As fabricantes passaram a utilizar o módulo amplificador junto a bobina para evitar danos ao ECU por calor excessivo. Desta mesma forma, as fabricantes de ECU programáveis não utilizam módulo amplificador interno, e oferecem módulos amplificadores separados para utilizar bobinas convencionais de 3 pinos, e isto será necessário para este projeto.

### 4.2.2. VELAS DE IGNIÇÃO

As velas de ignição originais Bosch tem como número de referência 0 242 235 914, cujo material do eletrodo central, segundo Bosch (2019) é Níquel-Ítrio e Cobre (NiY + Cu). Esta vela de ignição possui dois eletrodos de massa e distância entre eletrodos de 0,90mm.

## 4.3. SISTEMA DE INJEÇÃO ELETRÔNICA ORIGINAL BOSCH MOTRONIC

Os fatores principais para escolha do sistema de injeção programável é a capacidade deste novo sistema de funcionar como o original. Ou seja, utilizar todos os sensores e atuadores originais do veículo para ser calibrado, mantendo características de método de injeção de combustível e de ignição.

O módulo de ECU do automóvel, assim como todos os componentes relacionados a injeção e ignição, é feito pela fabricante Bosch, denominado MOTRONIC M3.1. O ECU tem número de referência 0 261 200 413 (Figura 4.5), e possui uma ótima capacidade de processamento para a época e um conector principal com 88 pinos, entre entradas e saídas. As



tabelas de mapas de injeção e ignição são armazenadas em um chip de memória Rom de 27 pinos.

Figura 4.5 - Módulo de injeção original Bosch 0 261 200 413.



(Fonte: Autor)

#### 4.3.1. SENSOR DE FLUXO DE MASSA DE AR BOSCH 0280217502

A principal informação lida pelo *ECU* original para controlar a injeção de combustível é a massa de ar que flui pelo motor. Este valor de entrada é lido por um sensor de fluxo de massa de ar (MAF), feito pela Bosch com referência 0 280 217 502 em unidades de Kg/h. Na figura 4.6, observa-se a geometria desde sensor, que fica instalado entre o filtro de ar do motor e o corpo do acelerador.

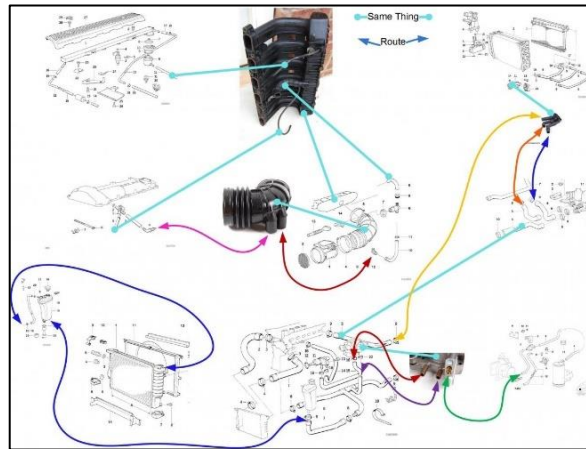
Figura 4.6 – Sensor de fluxo de massa de ar Bosch 0 280 217 502



(Fonte: Catálogo online Bosch, 2019)

Este sensor funciona muito bem em um sistema bem isolado, sem nenhum tipo de alteração ou vazamento em nenhuma das várias conexões de vácuo entre o corpo de borboleta e as válvulas de admissão do motor. A figura 4.7 é um diagrama representando o sistema de vácuo do coletor de admissão do motor M50TUB25.

Figura 4.7 – Diagrama de mangueira de vácuo do coletor de admissão



(Fonte: Cardiagn, 2019)

Há diversas desvantagens na utilização deste tipo de sensor, a principal delas é que qualquer alteração indesejada no fluxo de ar, por exemplo, alteração de vácuo em alguma mangueira conectada ao coletor de admissão (comum principalmente em motores com quilometragem elevada), resultará em um mal funcionamento do motor, apresentando marcha lenta irregular, valores de mistura ar/combustível alterado, queda de desempenho do motor e falhas durante aceleração.

Este sensor é conhecido por apresentar falhas causadas por sujeira na admissão, alterações em voltagem no sistema elétrico, oxidação, entre outros motivos. Isto causa diversos problemas, como dificuldade para dar partida no motor, o motor morre após a partida ou quando atinge temperatura de trabalho. O custo desta peça está em média R\$ 1.400 reais no mercado de peças nacional. Ao eliminar esta peça, a confiabilidade aumentaria e custo de manutenção do automóvel reduziria significativamente.

Com o uso da injeção programável, esta informação de fluxo de ar será desnecessária para a calibração do motor, pois a nova ECU irá utilizar um sensor de pressão de ar no coletor de admissão (MAP), que é integrado ao módulo.

#### 4.3.2. SENSOR DE OXIGÊNIO BOSCH 0 258 005 324

O sistema de controle deste motor em estudo é considerado de malha fechada, pois utiliza-se o sinal de um sensor de oxigênio instalado no escapamento para medir os gases resultantes da combustão do motor para corrigir o tempo de abertura das válvulas injetoras de combustível. Este sensor é fabricado pela Bosch e tem como número de série 0 280 005 324, figura 4.8. Segundo informações técnicas da Bosch, é um sensor por mudança em passo, e faz

leitura de tipo banda estreita, com sinais úteis variando de 0 V a 1 V. A tabela apresentada no Apêndice A relaciona o valor do sinal em V para fator Lambda.

Figura 4.8 – Sensor de oxigênio Bosh 0 280 005 324



(Fonte: Catálogo Online Bosch, 2019)

Segundo Capelli (2010, p. 285) “Ela também é conhecida como sensor de oxigênio, e o seu principal elemento constituinte é o zircônio. Dependendo da sua construção, podemos encontrá-la em diferentes tecnologias, tais como EGO, HEGO E ISSO-HEGO.

A superfície externa do elemento de zircônio está em contato com o gás de escape; a interna está em contato com o ar atmosférico. Ambas estão revestidas por uma fina camada de platina, que age como eletrodo para conduzir o sinal do sensor (do elemento de zircônio) até os fios condutores.

Uma importante característica do elemento de zircônio é que ele se torna condutor de íons de oxigênio a uma temperatura acima de 300°C, gerando uma tensão elétrica se houver uma diferença na concentração de oxigênio entre a parte interna e a externa do elemento. Uma tensão próxima de zero é gerada se a mistura ar/combustível for pobre ( $\lambda < 1$ ). Quando a mistura ar/combustível se aproxima da relação ideal (estequiométrica;  $\lambda = 1$ ), existe uma variação brusca na tensão gerada, entre 0 e 1 V.”

Este tipo de sensor é limitado quanto a precisão de leitura (pois a janela de leitura é menor, e feita por passos) e rapidez, mas para um sistema de injeção original é ideal pois é utilizado apenas para correção em faixas de operação onde se deseja a mistura ar/combustível próxima da estequiométrica e não para calibração. Este sensor não responde ao ECU qual a mistura ar/combustível exata, apenas se está operando com mistura rica, pobre ou próxima da estequiometria. Veículos em testes para calibração de motor passam por diversas condições (diferentes temperaturas e pressões atmosféricas) de funcionamento para que os valores de

tempo de injeção sejam programados de forma que abrange a todos as condições em que o veículo irá operar, garantindo que o motor irá funcionar sempre o mais próximo a calibração de dinamômetro. Por isto, o erro e, por consequência, a correção é pequena, no máximo 2,5%.

Injeções eletrônicas mais modernas estão passando a utilizar sensores de oxigênio de banda larga, ou seja, possuem uma faixa de leitura maior comparada as sondas convencionais. Sua faixa de leitura é de fator Lambda 0,65 a 1,29, o que abrange todas as faixas de operações de um motor (baixa, média e plena carga). Observa-se no Apêndice B que os valores de sinal gerado pelo sensor varia entre 0,2 V a 4,8 V; onde 2,7 V corresponde ao fator  $\lambda = 1$  (mistura estequiométrica), valores menores que este corresponde a uma mistura rica e maiores a mistura pobre.

As injeções eletrônicas programáveis podem utilizar este tipo de sonda de banda larga para a leitura da mistura ar/combustível como parâmetro para calibração de mapas de injeção de combustível. Convencionou-se entre fabricantes de sistemas de injeção programável a usar sensores de oxigênio Bosch do tipo LSU 4.2. Para este projeto será utilizado a sonda com referência 0 258 007 351, figura 4.9. O sinal desta sonda precisa ser tratado e condicionado para valores de lambda, para isto utiliza-se um módulo condicionador de sonda lambda para ler os valores de mistura em fator lambda.

Figura 4.9 – Sensor de oxigênio Bosch LSU 4.2 0 258 007 351



(Fonte: Catálogo Online Bosch, 2019).

#### 4.3.3. SENSOR DE ROTAÇÃO

O principal sinal de leitura para o funcionamento da injeção eletrônica é a rotação do motor, medida em rotações por minuto. Os mapas de injeção de combustível e avanço de ignição são baseados neste sinal. Desde a partida do motor este sinal é importante para fazer o motor funcionar, é configurada uma rotação mínima para que se determine o tempo de injeção

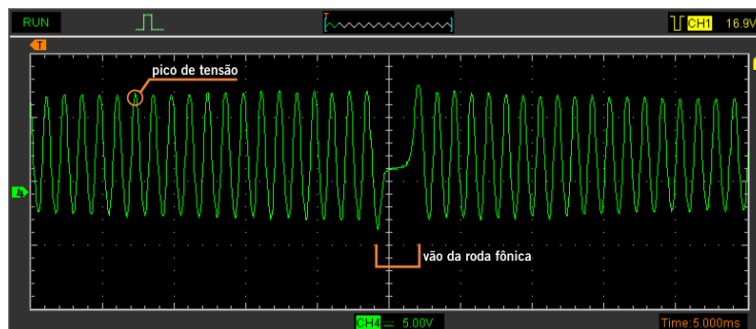
e avanço de ponto de ignição suficiente para funcionar o motor e em seguida em marcha lenta, isto será explicado posteriormente. Além da rotação, este sensor detecta a posição do ponto morto superior, importante para o mapa de ponto de ignição.

Conforme Capelli (2010, p. 277), “A função desse sensor é informar a rotação do motor e a referência do ponto morto superior dos pistões. O sensor está localizado sobre a roda dentada (também conhecida como roda fônica) e seu sinal é enviado segundo oscilações provocadas no momento em que os dentes da roda passam por ele.”

“O sensor é constituído de um estojo tubular dentro do qual há um ímã permanente e uma bobina. O fluxo magnético criado pelo ímã sofre, devido a passagem dos dentes da roda fônica, oscilações derivadas da variação do entreferro”. Capelli (2010, p. 278).

A roda fônica do motor M50TUB25 em estudo possui uma roda fônica com 60 dentes, dos quais 2 são removidos para servir de referência do PMS. Esta falha gera um pico e um vale distintos no sinal do sensor de rotação, como pode ser observado em uma imagem de osciloscópio na figura 4.10, cada dente provoca um pico com tensão uniforme, quando a falha passa pelo sensor indutivo, este pico não é gerado, assim o ECU detecta o ponto morto superior o primeiro cilindro do motor.

Figura 4.10 – Gráfico gerado por sinal de sensor de rotação utilizando osciloscópio.



(Fonte: Site Doutor IE, 2019)

O sistema de injeção em estudo utiliza um sensor indutivo da fabricante Bosch com número de referência 0 261 210 053, figura 4.11. Tem ligação elétrica compatível com todas as injeções, com dois pinos de sinais (ligado em cada ponta da bobina) e um de aterramento.

Figura 4.11 – Sensor de rotação indutivo Bosch 0 261 210 053



(Fonte: Catálogo online Bosch, 2019)

#### 4.3.4. SENSOR DE FASE

Motores que possuem ECU que operam com injeção de combustível e ignição sequencial (um pulso de válvula injetora e uma centelha de ignição para cada ciclo por cilindro) necessitam do sinal de posição do comando de válvulas para poder injetar combustível e ignição no momento exato para cada cilindro. Este sinal é obtido pelo sensor de fase, e segundo Capelli (2010, p. 280), “Sua função é informar a referência de fase do primeiro cilindro para determinar o momento de injeção e/ou ignição (sequencial). O sinal à central eletrônica é gerado por um sensor de efeito Hall montado na polia de comando da árvore de comando de válvulas no lado da admissão.”

Ao ter a referência da posição do comando de válvulas (da mesma forma que no sensor de rotação) quando o motor está em ponto morto superior, a ECU é programada para encontrar a posição de todos os outros cilindros, medindo esta diferença em graus. O sensor utilizado pelo sistema original é fabricado pela Bosch e tem número de referência 0 232 103 003, figura 4.12. O objetivo deste estudo é manter as características de funcionamento originais, portanto, este sensor será mantido na instalação da ECU programável. Logo é necessário selecionar uma injeção programável com capacidade e entradas e saídas suficientes para ligar este sensor, 6 saídas para bicos injetores e 6 saídas para as bobinas de ignição.

Figura 4.12 – Sensor de fase Bosch 0 232 103 003



(Fonte: Catálogo online Bosch, 2019)

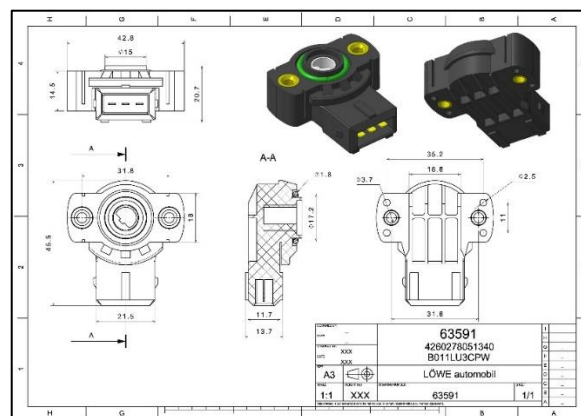
#### 4.3.5. SENSOR TPS

Um parâmetro importante para calibração e compensações de inje de uma ECU é o sensor de posição do corpo do acelerador. Segundo Capelli (2010, p. 267), “Perto do eixo de borboletas temos um sensor, que é um potenciômetro que muda sua resistência elétrica proporcionalmente á abertura da borboleta. Por meio desse sinal, a ECU sabe o quanto o motorista está ‘pisando’ no acelerador, e então manda mais ou menos combustível para o sistema.”

O sensor utilizado neste motor tem como número de referência da fabricante 1363172145 (figura 4.13) e tem como resistência máxima 4Kohm. Possui 3 pinos elétricos, pino 1 ligado ao aterramento da ECU (Pino 44), pino 2 retornando sinal (Ligado ao pino 73 da ECU) e pino 3 alimentando 5 volts (Ligado ao pino 59 da ECU). Entre o pino 3 e 2 existe um potenciômetro, com resistência entre 1Kohm e 4Kohm, que varia de acordo com a rotação deste potenciômetro que está ligado ao eixo do corpo de borboletas. Esta variação resulta em um retorno de sinal entre 0,2 e 4,2 volts.

Este sensor é confiável, recomendado pela Bosch ser substituído a cada 250.000km, e tem um custo relativamente baixo, cerca de R\$150. Portanto este sensor será mantido e será ligado a injeção programável, assim evitando adaptações no corpo de borboleta.

Figura 4.13 – Sensor de posição de acelerador



(Fonte: LÖWE Automobil, 2019).

#### 4.3.6. SENSOR DE TEMPERATURA DO AR DE ADMISSÃO

A fim de manter o desempenho do motor e preservar sua vida útil em diversas condições de funcionamento (diferentes temperaturas ambientes, humidade relativa do ar, pressão atmosférica), o ECU precisa corrigir o tempo de injeção e avanço do ponto de ignição conforme

informações são enviadas a ele. Um dos principais sinais para estas correções é o de temperatura do ar de admissão, ou seja, a temperatura do ar que fará mistura com combustível e será admitido pelo motor.

Esta temperatura é crítica quando o ar admitido está com temperaturas baixas, pois a atomização do combustível é dificultada, devido a propriedade de volatilidade do combustível. Assim, é necessário injetar mais combustível para aumento de temperatura e manter a mistura ar/combustível desejada.

O sensor utilizado pela ECU original é fabricado pela Bosch e tem referência 0 280 130 060. Segundo Lima (2017, p.46), “Sensor de temperatura envia os dados para a ECU através do contato com o fluido. O sensor possui a ponta de capacidade resistiva, com a variação da temperatura o sensor informa ao ECU o sinal elétrico. O circuito é um divisor de tensão. O módulo ECU enviará um sinal de referência de 5 volts, e irá mensurar através do resistor a diferença de tensão entre as duas resistências. O valor retornado a ECU deve estar entre 0 e 5 volts.”

A ECU é programada com o valor de resistência do sensor a uma determinada temperatura, assim utiliza esta referência para informar a temperatura de acordo com o quanto esta resistência mudou. Padronizou-se em ECU's programáveis que se utiliza os sensores de temperatura padrão Delphi / NTK (3,3 k $\Omega$  a 20 °C como resistência na temperatura de referência). Por isto, o sensor original Bosch será substituído este recomendado.

#### 4.3.7. SENSOR DE TEMPERATURA DO MOTOR

O sinal de temperatura do motor é importante para funções de proteção e compensação de funcionamento do motor. Conforme (LIMA, 2017), considera-se a temperatura normal de trabalho do motor o intervalo de 80 °C a 100 °C. Temperaturas fora deste intervalo ativam correções nos mapas de injeção de combustível e avanço de ignição para fazer com que o motor volte as suas condições normais de temperatura. Por exemplo, em temperaturas inferiores a 80 °C, a ECU aumenta o tempo de injeção de combustível e atrasa o ponto de ignição para que a temperatura na câmara de combustão aumente, por consequência aumentando a temperatura do motor. Caso a temperatura seja superior a 100 °C, a ECU aumenta o tempo de injeção (em um percentual menor) e adianta o ponto de ignição para que a temperatura de combustão diminua, forçando o motor a diminuir temperatura.



Este sensor é instalado na tubulação de saída do fluido de arrefecimento no cabeçote do motor, antes de retornar ao radiador. O sensor original é fabricado pela Bosch e tem referência 0 280 130 026. O princípio de funcionamento deste sensor é o mesmo do sensor de temperatura do ar de admissão, e da mesma forma, as ECU's programáveis utilizam do sensor de padrão Delphi / NTK de 3,3 k $\Omega$  a 20 °C como temperatura de referência. Este sensor será instalado em uma posição próxima do original na instalação da ECU programável. Este não será substituído pois o sensor original é utilizado para enviar o sinal de temperatura para o painel de instrumentos, e esta função não será perdida.

#### 4.3.8. SENSOR DE PRESSÃO DE ÓLEO

O sensor de pressão de óleo original BMW possui número de referência 12618611273 e tem a função apenas de alertar o motorista quando a pressão de óleo é inferior a 0,3 bar ao acender uma luz de alerta no painel do veículo. Este sinal não influencia em parâmetros na ECU, ou seja, não limita rotação ou desliga o motor.

Como injeções eletrônicas programáveis são voltadas a carros com motores modificados ou de competição, é necessário fazer uma leitura mais precisa da pressão de óleo a fim de proteger o motor. Motores que sofrem muita carga e trabalham em rotações mais elevadas estão mais propícios a queda de pressão de óleo, como por queda de viscosidade do óleo por conta de temperaturas elevadas. Por isto, usa-se sinal de pressão de óleo para desligar o motor ou limitar rotação em casos de queda de pressão de óleo.

As injeções eletrônicas programáveis utilizam sensores padrões PS10-A ou PS10-B, que segundo a Fueltech, fazem leituras de pressões em óleo, combustível e ar, em uma faixa de 0 a 10 bar e sinal variando de 1 a 5v. A tabela 4.4 mostra a ligação padrão deste sensor, e é compatível com todas as injeções programáveis do mercado.

Tabela 4.4 – Ligação de sensor PS10-A/B

Pinagem	Ligação
Pino 1	Negativo bateria
Pino 2	Sinal de saída 1 a 5V
Pino 3	12V pós-chave

(Fonte: Fueltech, 2019)

#### 4.3.9. SENSOR DE DETONAÇÃO

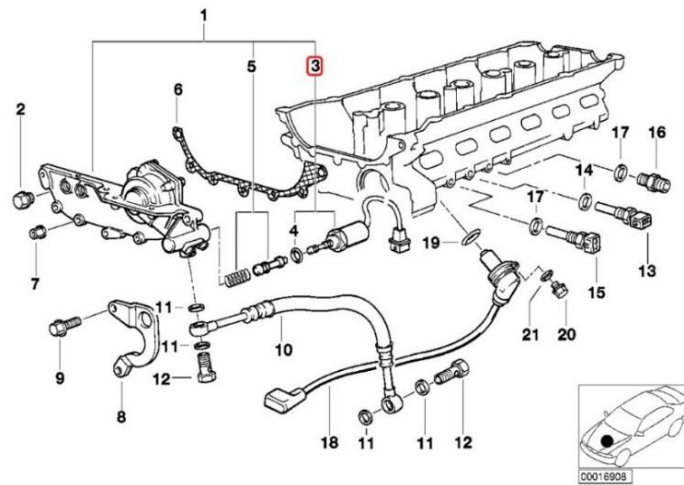
O sistema de injeção eletrônica em estudo recebe o sinal de três sensores de detonação (*knock sensor*) com número de referência Bosch 0 261 231 195, um para os cilindros 1 e 2, outro para 3 e 4 e o último para 5 e 6. Segundo Lima (2017, p. 47), “Knock Sensor como é chamado em inglês, é um sensor piezoelétrico extremamente sensível a vibrações que causam a formação de determinadas frequências. Quando ocorre a detonação espontânea do motor as ondas fazem vibrar o elemento piezoelétrico do sensor, gerando uma tensão elétrica que é enviada para a ECU, que deverá conter informações para que seja feitas as alterações na curva de ignição e combustível visando proteger o motor da destruição causada pela detonação espontânea.”

No sistema original Bosch MOTRONIC, dependendo o nível de ruído, é cortada a ignição do cilindro de onde provém o sinal, a fim de evitar qualquer dano até que seja solucionado o motivo da pré-detonação (combustão antes da centelha de ignição). Sem essa proteção, o pistão do cilindro que sofre pré-detonação pode sofrer fraturas devido as altas temperaturas e estresse gerado no material.

#### 4.3.10. COMANDO VARIÁVEL

O motor M50TUB25 possui um sistema de comando de válvulas variável. O cabeçote deste motor possui duas árvores de cames para controlar 24 válvulas. Ligado ao comando de válvulas de admissão, há um sistema de engrenagens que é acionado por pressão de óleo e um solenoide atuador elétrico, este sistema faz com que aumente ou diminua a duração de abertura e levante de válvulas, dependendo do regime que o motor está operando. Este sistema é chamado VANOS e patenteado pela BMW. Seu propósito é manter um funcionamento suave do motor em situações de baixa carga e baixa rotação e um alto rendimento em situações de alta carga

Figura 4.14 – Sistema de comando variável VANOS



(Fonte: RealOem, 2019)

A figura 4.14 mostra o sistema VANOS e seus sensores e atuadores. O item 3 destacado aponta para o solenoide que atua no acionamento do comando variável, e é controlado pelo ECU e programado para atuar em situações em que o motor demanda mais potência. Originalmente o ECU aciona este solenoide quando o motor atinge 4500 rpm, aumentando a eficiência do motor em altas rotações.

Alguns sistemas de injeção programável são capazes de controlar este solenoide, utilizando uma saída configurável onde programa-se o momento de acionamento do solenoide e o tipo de sinal de acionamento. A capacidade de controlar este solenoide é um dos critérios para selecionar o modelo de ECU utilizado neste projeto.

#### 4.4. SELEÇÃO DO SISTEMA DE INJEÇÃO PROGRAMÁVEL

Os principais critérios na escolha do sistema de injeção eletrônica programável são a capacidade de manter características de métodos de injeção e ignição da ECU original e capacidade de controlar todos os atuadores e receber todos os sinais de sensores utilizados na ECU original. Estas características irão diminuir significativamente a quantidade de modelos oferecidos pelo mercado.

Portanto, iremos analisar os modelos de sistema de injeção programável Fueltech FT500, Fueltech FT500 Lite, Fueltech FT550, Injepro SFI6 e Injepro S8000. Todas estas capazes de controlar a injeção de combustível e ignição de forma sequenciais. Cabe observar que a Fueltech dispõe de um modelo mais avançado, a FT600 SFI, porém seu custo é muito mais elevado pelos recursos para veículos de competição, que neste projeto não serão utilizados.

Os critérios que irão determinar qual destes modelos será escolhido são: Custo, recursos extras, interface e software. O custo benefício será o primeiro critério para selecionar o módulo, assim como custo de sensores necessários, módulo de ignição e condicionador de sonda.

#### 4.4.1. COMPARAÇÃO DOS SISTEMAS DE INJEÇÃO ELETRÔNICA POR CUSTO

Para comparar os preços entre os modelos de ECU programável considera-se o valor de todos os componentes necessários para utilizar todas as funcionalidades do ECU e manter os componentes do motor BMW M50TUB25. Estes componentes são o módulo ECU com chicote elétrico, tela sensível ao toque (Caso não seja integrado ao módulo ECU), condicionador de sonda de banda larga e módulo de injeção.

A tabela 4.5 detalha os custos dos produtos da fabricante Fueltech, os três modelos apresentados têm a capacidade de controlar injeção e ignição sequencial para 6 cilindros e controlam saída para comando variável. O modelo FT500SFI LITE apesar de ser o mais econômico, é o único modelo que não oferece uma tela sensível ao toque para leitura de informações de sensores como rotação do motor, temperatura do motor, pressão no coletor de admissão, tempo de injeção de combustível, avanço de ignição e entre outros. Além de acessar configurações de injeção e ignição, controle de marcha lenta, modificar mapas, carregar mapas diferentes entre outras funcionalidades que serão explicadas posteriormente.

Tabela 4.5 – Tabela comparativa de preços Fueltech

	Fueltech FT500SFI LITE	Fueltech FT500SFI	Fueltech FT550 SFI
Módulo com chicote elétrico	R\$ 3.590,00	R\$ 5.390,00	R\$ 5.990,00
Tela	Não disponível	Incluso	Incluso
Condicionador Wideband	R\$ 650,00	R\$ 650,00	R\$ 650,00
Módulo de Ignição	R\$ 780,00	R\$ 780,00	R\$ 780,00
Total	R\$ 5.020,00	R\$ 6.820,00	R\$ 7.420,00

(Fonte: Fueltech®, 2019)

A tabela 4.6 detalha os custos dos dois sistemas de injeção programável da fabricante Injepro que são compatíveis com o projeto. A Injepro não tem módulos de ECU com tela sensível ao toque integrado, porém oferece uma tela para ser utilizado como painel de instrumentos como opcional. Além de poder visualizar informações sobre funcionamento do motor, também é possível acessar e modificar as configurações de injeção e ignição.

Tabela 4.6 – Tabela comparativa de preços Injepro

	Injepro SFI6	Injepro S8000
Módulo com chicote elétrico	R\$ 3.390,00	R\$ 4.450,00
Tela	R\$ 1.979,00	R\$ 1.979,00
Condicionador Wideband	R\$ 638,00	R\$ 638,00
Módulo de Ignição	R\$ 640,00	R\$ 640,00
Total	R\$ 6.647,00	R\$ 7.707,00

(Fonte: Injepro®, 2019)

#### 4.4.2. ANÁLISE QUALITATIVA DOS SISTEMAS DE INJEÇÃO PROGRAMÁVEL

Para poder analisar o custo benefício de cada sistema de injeção, é necessário fazer uma análise qualitativa dos componentes. Todos os recursos serão listados de acordo com a ficha técnica fornecida pelos fabricantes.

##### 4.4.2.1. FUELTECH FT500 LITE E FUELTECH FT500

Segundo a Fueltech, a única diferença entre os dois modelos (FT500 LITE e FT500) é a ausência da tela sensível ao toque na FT500 LITE, até mesmo na sua construção, compare as figuras 4.15 e 4.16, a primeira mostra a FT500 LITE, a segunda a FT500. Portanto, com a FT500 LITE só é possível fazer alterações nos mapas de injeção e ignição se conectado a um computador, uma grande desvantagem em relação a todos os outros sistemas analisados. No Apêndice C há a ficha técnica dos dois módulos de injeção.

Figura 4.15 – Módulo de ECU Fueltech® FT500 LITE



(Fonte: Fueltech®, 2019)

Figura 4.16 – Módulo de ECU Fueltech® FT500



(Fonte: Fueltech®, 2019)

Observa-se que estes dois modelos da Fueltech atendem perfeitamente os requisitos deste projeto, consegue operar o modo de injeção e ignição sequencialmente, possui saídas suficientes para controlar as 6 válvulas injetoras e as 6 bobinas individualmente. Desde já se elimina o modelo FT500 LITE pela ausência da tela, a praticidade de poder observar dados sobre o funcionamento do motor em tempo real e poder fazer ajustes rápidos nos mapas de injeção e ignição é essencial para calibrar a ECU da melhor forma o possível, não é prático andar com o automóvel sempre conectado a um computador.

#### 4.4.2.2. FUELTECH FT550

A Fueltech FT550 é uma evolução da FT500, possui uma série de melhorias em software, design e recursos, além de um maior número de entradas e saídas configuráveis. No Apêndice D há uma ficha técnica de todos os recursos e funcionalidades deste modelo de módulo de injeção.

Um das grandes diferenças em design é o gabinete resistente a água, com conectores automotivos no padrão *Superseal* (Os quais são selados e não permitem entrada de água, observe a figura 4.17. A tela, diferente da FT500, é antirreflexo, o que facilita a visualização de informações com qualquer tipo de luz ambiente.

Figura 4.17 – Módulo de ECU Fueltech® FT550



(Fonte: Fueltech, 2019)

Vale destacar as seguintes funcionalidades, o que facilita o acerto fino do motor e uso do veículo em diversas situações do dia a dia:

- Escala de leitura dos sensores editável (permite utilizar sensores originais com escalas diferentes do padrão);
- Mapa de partida do motor por temperatura do motor (permite configurar tempo de injeção e avanço de ignição na partida em diversas temperaturas de motor);
- Enriquecimento de combustível após partida (ajuda o motor a atingir a temperatura ideal mais rápido);
- Compensação de combustível por marcha (permite diferentes valores de mistura ar/combustível dependendo da marcha, pois há diferentes cargas no motor, ajuda na economia de combustível);
- Corte de combustível na desaceleração (conhecido como *cut-off*, permite que, quando se fecha a borboleta do acelerador, corte o combustível, fazendo gerar freio motor e economia de combustível);
- Controle de acionamento de ar condicionado (compensa tempo de injeção, ponto de ignição e rotação quando o condicionador de ar é ativado);
- Partida a frio com reservatório (Permite utilizar um tanque e um injetor de gasolina para partidas a frio, quando se utiliza etanol, uma possibilidade de melhoria futura para o projeto);
- Entrada para sensor Flex-Fuel (permite construir mapas de injeção e ignição para mistura de gasolina e etanol, uma possível melhoria futura para o projeto).

- Controle de tração ativo (limita a potência do motor ao detectar que as rodas motoras estão girando mais que as rodas de referência de velocidade; é necessária instalação de sensores de velocidade nas rodas, uma possibilidade de melhorias futura).

Este módulo de injeção possui muitas vantagens em relação a Fueltech FT500, pois permite algumas melhorias como as citadas acima que podem tornar o motor mais bem calibrado e mais versátil. Por isto, apesar de ter um valor maior que a FT500, a FT550 possui um melhor custo x benefício, isto já elimina a FT500 da escolha.

#### 4.4.2.3. INJEPRO SFI6 E INJEPRO S8000

A primeira desvantagem dos módulos de injeção da fabricante Injepro é que não há um modelo com tela sensível ao toque integrada, a tela é vendida separadamente por R\$ 1.979,00. A tela é fabricada em alumínio e têm luzes indicativas para troca de marcha ou alertas integrados, como se observa na figura 4.18.

Figura 4.18 – Tela sensível ao toque Injepro®



(Fonte: Injepro®, 2019)

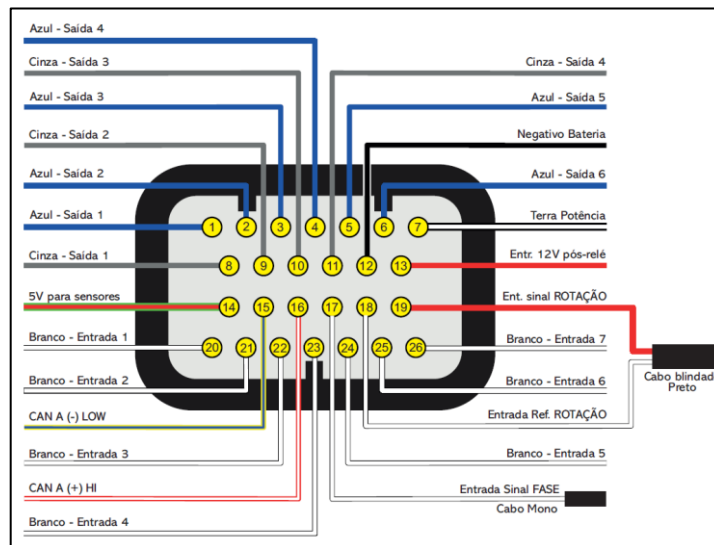
Observa-se no Apêndice E uma tabela comparativa com todas as funções dos módulos SFI6 e S8000. Tecnicamente, a única diferença relevante entre os dois módulos de injeção é a capacidade de operar a injeção de combustível em modo sequencial, a SFI6 opera seis injetores, e a S8000 opera oito, apesar de que os dois módulos atendam o projeto nesse quesito. Ainda assim, os dois modelos são inferiores em capacidade e em funções, a Fueltech FT550 dispõe de várias funções que tornam o veículo mais prático e melhor ajustado. Por este motivo, seleciona-se para este projeto o módulo Fueltech FT550, pois atende a todos os requisitos, tem o melhor custo x benefício, melhor interface, software e muitos recursos extras que poderão ser explorados futuramente neste projeto.



#### 4.5. INSTALAÇÃO ELÉTRICA

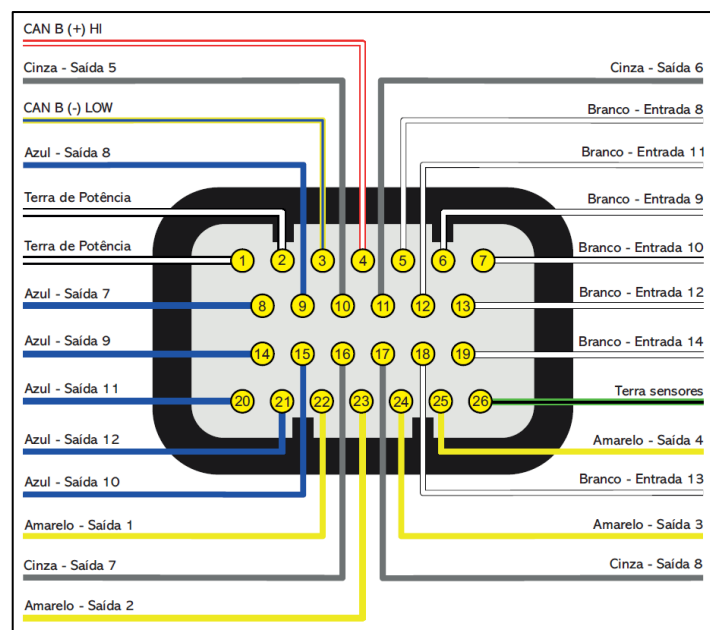
O módulo de injeção Fueltech FT550 possui dois conectores automotivos de 26 pinos, destinados a entradas, saídas, alimentação de sensores, aterramento de potência, comunicação, negativo da bateria e entrada para 12v de alimentação do módulo. A figura 4.19 e 4.20 mostram os conectores A e B respectivamente, os dois são usados para ligação de sensores e atuadores responsáveis pelo funcionamento do motor.

Figura 4.19 – Conector A Fueltech FT550



(Fonte: Fueltech®, 2019)

Figura 4.20 – Conector B Fueltech FT550



(Fonte: Fueltech®, 2019)

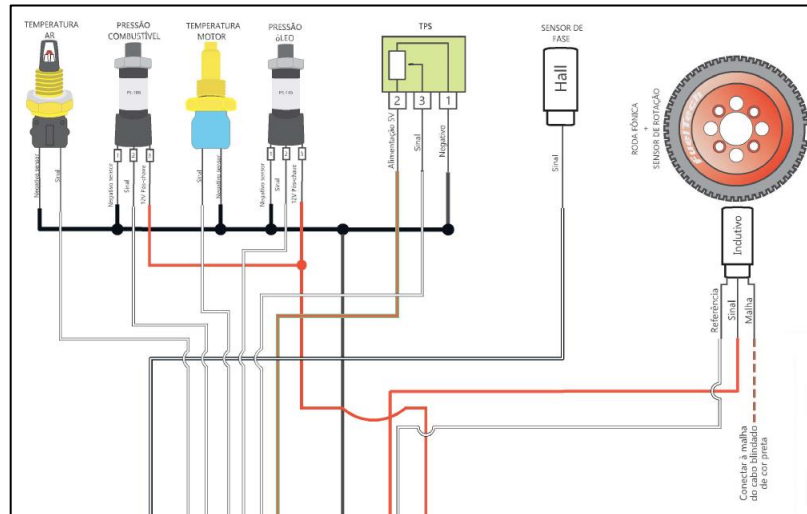
O diagrama de ligação elétrica para a ligação do motor M50TUB25 está apresentada no Apêndice F, criado pelo autor com auxílio do software FT Manager® versão 4.27. Os pinos de ligação utilizados estão listados abaixo:

- Entradas:
  - Sinal de rotação do motor;
  - Temperatura do ar de admissão;
  - Pressão de combustível;
  - Entrada de referência de rotação;
  - Sinal de sensor de fase;
  - Pressão do óleo;
  - Sensor de oxigênio;
  - Sinal de botão do ar condicionado.
- Saídas:
  - Uma saída para cada injetor (seis);
  - Uma saída para cada bobina (seis);
  - Acionamento de bomba de combustível;
  - Eletro ventilador 1 e 2 (Saídas separadas);
  - Acionamento de ar condicionado;
  - Comando variável.

Mesmo ligando todas as entradas e saídas listadas acima, ainda sobraram seis entradas configuráveis e 3 saídas configuráveis para futuras melhorias no projeto, como uso de sensor *flex fuel*, controle de tração etc.

A ligação de sensores principais está representada na figura 4.21. Os sensores de pressão de óleo e combustível são alimentados por uma tensão de 12 volts e por consequência são ligados ao negativo da bateria, retornando o valor de sinal pelo fio branco. O sensor de posição do acelerador é alimentado por uma tensão de 5 volts vindo do módulo de injeção, ligado pelo fio de sinal e negativo da bateria. Os sensores de temperatura são resistivos, como explicado no capítulo 4.3.6 e 4.3.7, portanto só recebem ligação do sinal e negativo da bateria. O sensor de rotação e sensor de fase são ligados como explicado no capítulo 4.3.3 e 4.3.4.

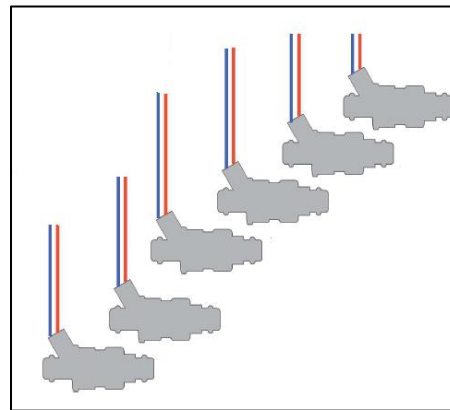
Figura 4.21 – Ligação de sensores principais



(Fonte: Fueltech®, 2019)

A figura 4.22 ilustra a ligação dos injetores de combustível, os fios azuis são as saídas de 1 a 6 do conector A, os fios vermelhos são alimentação de tensão 12 volts vindos do relé acionado pela chave de ignição.

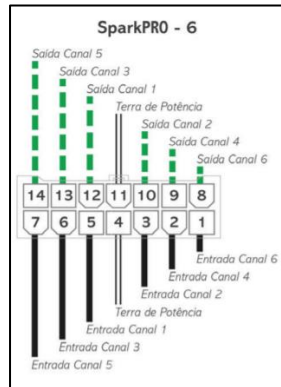
Figura 4.22 – Ligação de bicos injetores



(Fonte: Fueltech®, 2019)

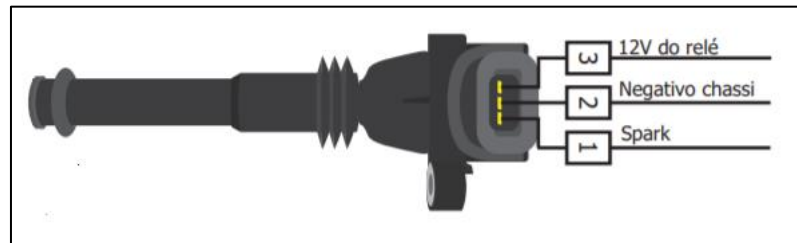
Como explicado no capítulo 4.2.1, as bobinas de ignição do motor M50TUB25 não possuem amplificador de tensão interna, por isto é necessário o uso de um módulo de ignição da fabricante Fueltech. Para ligação das 6 bobinas de forma individual, é necessário o uso do modelo de amplificador SparkPRO – 6. A figura 4.23 representa a ligação elétrica do módulo amplificador, os fios pretos representam a saída do módulo de injeção, que neste projeto são os fios cinzas, os fios verdes, representam as saídas amplificadas do módulo que serão ligados no pino 1 da bobina de ignição, como na figura 4.24.

Figura 4.23 – Ligação do módulo SparkPRO 6®



(Fonte: Fueltech®, 2019)

Figura 4.24 – Ligação de bobina de ignição



(Fonte: Fueltech, 2019)

#### 4.6. SOFTWARE DE CONFIGURAÇÃO DO MÓDULO DE INJEÇÃO PROGRAMÁVEL

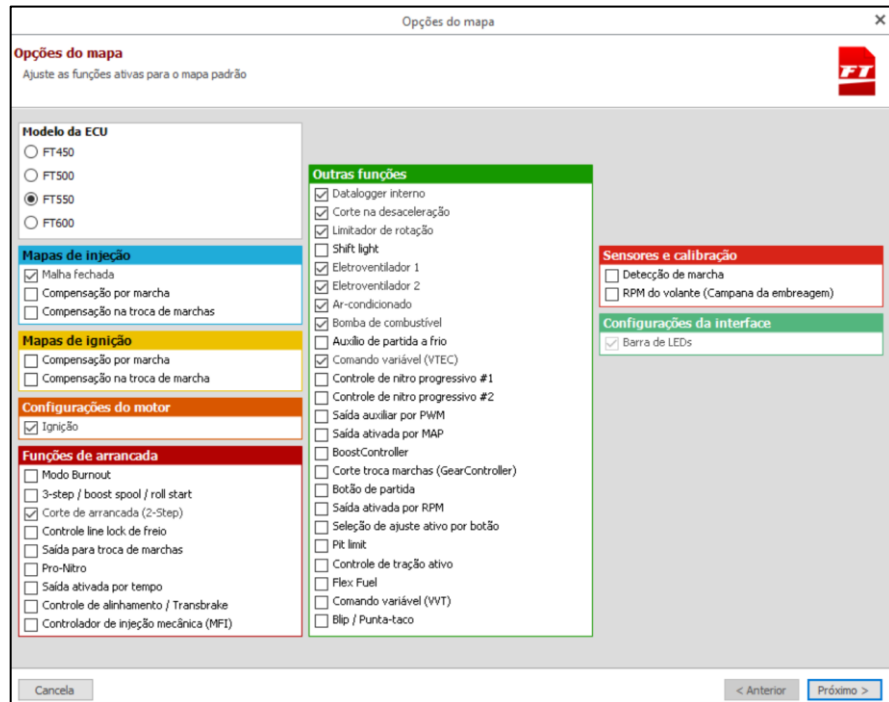
Após a instalação elétrica completa do sistema de injeção eletrônica programável, se utiliza o software FT Manager para configurações do módulo de injeção. Basicamente ensina-se ao computador quais componentes ele irá controlar e de que forma irá controlar.

O software FT Manager é uma interface que auxilia o programador a conectar-se ao ECU, ao criar um mapa, o software ajuda a configurar quais entradas, saídas, recursos, tipos de sensores e métodos de injeção e ignição que serão utilizados para controlar o motor. Também se configura a vazão de injetores, e outras características do motor, como número de cilindros, taxa de compressão e graduação do comando de válvulas.

A figura 4.27 mostra a primeira tela de configuração inicial do ECU. É selecionado o modelo do ECU, configurações básicas de mapas de injeção, que neste projeto é usado sistema de malha fechada com o sensor de oxigênio. Nesta parte também é selecionado as funções que serão utilizadas e controladas pelo módulo. Neste projeto é utilizado a função de arrancada para corte de giro de arrancada, e outras funções como *datalogger* interno (função de coleta e

gravação de dados de sensores e atuadores para análise), corte na desaceleração (corte de combustível ao tirar o pé do acelerador: *cut-off*), limitador de rotação, eletroventilador 1 e 2, ar condicionado, bomba de combustível e comando varável.

Figura 4.27 – Configuração de módulo ECU, tipos de mapa e funções



(Fonte: Software FT Manager®, 2019)

A segunda parte da configuração consiste em selecionar as características do motor, a figura 4.28 mostra as opções selecionadas para este projeto. Indica-se o tipo de motor e número de cilindros, no caso do motor M50TUB25 é um motor a pistão com 6 cilindros. Habilita-se a tabela de lenta por TPS (Sensor de posição de borboleta, assim a condição para ativar parâmetros de marcha lenta é se o sinal de TPS é 0%), referência do mapa de injeção principal (opção de ser por sinal de MAP ou TPS), referência para injeção rápida (por variação brusca de sinal de TPS ou MAP), pressão de turbo máxima (neste projeto 0 bar, pois é um motor naturalmente aspirado), rotação máxima do motor para configuração dos mapas e ordem de ignição.

Figura 4.28 – Configuração de características do motor

Gerar mapa padrão - Características do motor

**Características do motor**  
 Seleccione as opções conforme as características do motor, estas informações serão importantes para gerar o mapa padrão.

**Tipo de motor**  
 Pistão

**Tabela de lenta por TPS**  
 Habilitado

**Número de cilindros**  
 6

**Mapa principal injeção**  
 MAP

**Injeção rápida**  
 TPS

**Pressão de turbo máx.**  
 0,00 bar

**Rotação máxima**  
 7200 RPM

**Ordem de ignição**  
 Predefinida  
 Customizada

1-5-3-6-2-4 (GM em linha (Opala e Omega), VW VR6, Ford e BMW em linha)  
 1-2-3-4-5-6 (Padrão FT200, FT250, FT300, FT350 e FT400)  
 1-6-5-4-3-2 (GM V6 (S10/Blazer 4.3))  
 1-4-2-5-3-6 (Ford Ranger V6)

1	2	3	4	5	6
1	5	3	6	2	4

Cancela < Anterior Próximo >

(Fonte: Software FT Manager®, 2019)

O próximo passo de configuração é a seleção das características do sistema de rotação do motor, que basicamente é ensinar o módulo quais os tipos de sinais são utilizados para leitura da rotação do motor. É selecionado o tipo de sensor de rotação e tipo de borda de sinal, tipo de sensor de fase e configurações da roda fônica (suas características físicas como número de dentes e falhas, e alinhamento do primeiro dente com o sensor de rotação). Note que não é obrigatório o uso do sensor de fase, porém não seria possível usar injeção e ignição no modo sequencial e comando de válvulas variável, pois esta é a referência para saber o ângulo dos comandos de válvulas.

Figura 4.29 – Configuração de sinal de rotação do motor

**Sinal de RPM**  
 Seleccione as características do sistema de rotação do motor.

**Sensor de Rotação**  
 Tipo do sensor de rotação  
 Hall  
 Indutivo simples  
 Indutivo diferencial  
 Borda do sinal de rotação  
 Descida

**Sensor de Fase**  
 Tipo do sensor de fase  
 Não utilizado  
 Hall  
 Indutivo  
 Indutivo diferencial  
 Aleatoria Hall - Diagnóstico  
 Aleatoria Indutivo - Diagnóstico  
 Borda do sinal de fase  
 Descida

**Roda Fônica**  
 Roda Fônica  
 60-2 (no virabrequim)  
 Alinhamento do primeiro dente  
 93,0 16 dentes +3,0°  
 Tipo de roda fônica  
 Com dente faltando  
 Número de dentes da roda  
 60  
 Número de dentes faltando  
 2  
 Ângulo de dente adicional  
 0,0  
 Tempo de duração da falha  
 1,75

(Fonte: Software FT Manager®, 2019)

A figura 4.30 mostra a página de configuração das características do sistema de ignição do motor. É selecionado o modo de ignição, que neste projeto é sequencial com bobinas individuais com saída de ignição de borda de descida e controle de *dwell* (carga da bobina), que é a saída do módulo SparkPRO. Há a opção de uso de um módulo de ignição capacitiva de alta energia (FTSPARK) e carga de bobina fixa. Desta forma, o ECU irá habilitar e configurar automaticamente as saídas de ignição, assim só é necessário criar os mapas de ignição e configuração de carga de bobina.

Figura 4.30 – Configuração características do sistema de ignição

(Fonte: Software FT Manager®, 2019)

É necessário a configuração do sistema de injeção de combustível, assim o software pode configurar as saídas para válvulas injetoras e método de injeção, por fim gerar um mapa aproximado de injeção para funcionar o motor na primeira partida, e poder ajustar o mapa para que funcione da maneira correta. A figura 4.31 mostra a página de configuração de características de injeção do motor, é possível configurar duas bancadas de injetores, A e B, caso o projeto utilize injetores extras. Nas duas bancadas é possível configurar o número de saídas de injetores, este projeto utiliza seis saídas (em modo semisequencial, seria três saídas, multiponto, uma saída).

Entra-se com o valor total de vazão dos injetores, ou seja, o somatório de vazão de todos os injetores em unidades de libras por hora. Esta informação ajuda o software a criar um mapa de injeção aproximado para funcionar o motor antes do acerto fino. Configura-se o *Dead time* dos injetores em unidades de milissegundos, segundo Lima (2017, p. 73) “Um injetor pode estar totalmente aberto ou totalmente fechado, portanto, a determinação da quantidade de

combustível injetada é feita pelo tempo que ele permanece aberto e o tempo que ele permanece fechado em cada ciclo de rotação. Quando é iniciado o pulso de injeção, existe um pequeno período de tempo em que a agulha do injetor ainda não abriu mecanicamente para a passagem do combustível, sendo este tempo de injeção considerado o ‘tempo morto’ ou ‘deadtime’ do injetor. Em algumas situações, para o acerto principal da marcha lenta alterações no ‘dead time’ ajudam a obter um maior controle de válvula injetora, principalmente os de alta vazão”.

É essencial a correta configuração do tempo de latência dos injetores, isto ajudará a refinar o acerto dos mapas de injeção. Em regime de marcha lenta, os injetores ficam abertos por um tempo mínimo, caso o tempo configurado de *deadtime* seja maior do que o real, o módulo de injeção estará enviando pulsos de corrente maior que o necessário, isto fará com que haja oscilações nos valores de mistura ar combustível e por consequência oscilações de rotação do motor e variação no avanço de ponto de ignição.

Segundo dados do catálogo de injetores Bosch 2010, os injetores utilizados neste projeto com referência 0 280 155 968 possui vazão de 42 Lbs/h a 3 bar e tempo de latência (*deadtime*) de 0,459ms a 12 volts e 0,224ms a 14 volts. A tensão de saída de injeção do módulo FT550 é 12 volts, por tanto é configurado a aproximação de 0,46ms.

Figura 4.31 – Configuração características do sistema de injeção

(Fonte: Software FT Manager®, 2019)

A última parte de configuração das características do motor consiste em programar o tipo de borboleta de acelerador e como será feito o controle de marcha lenta. A figura 4.32 mostra a página de configuração, pode-se optar o tipo de detecção de abertura da borboleta, este



motor possui acelerador acionado a cabo e sensor de posição de acelerador. É configurado o atuador de marcha lenta, o motor M50TUB25 utiliza um atuador com abertura por motor de passo com 260 posições.

Figura 4.32 – Configuração características do pedal, borboleta e atuador de marcha lenta

(Fonte: Software FT Manager®, 2019)

#### 4.7. CONFIGURAÇÃO DE MAPA DE INJEÇÃO DE COMBUSTÍVEL

O mapa principal de injeção de combustível é baseado em dois parâmetros, a pressão absoluta do coletor de admissão, que é lido em Bar pelo sensor MAP (*Manifold air pressure*) e velocidade de rotação do motor, lido em rpm pelo sensor de rotação. Ou seja, o tempo de injeção das válvulas injetoras de combustível em um determinado instante é determinado pelas condições de trabalho do motor naquele mesmo instante, o ECU consulta os valores dos sensores MAP e de rotação e então busca na tabela qual o tempo de injeção para aquelas condições.

Os valores de tempo de injeção são ajustados de forma que o valor lido pelo sensor de oxigênio seja compatível com o que o programador deseja. Para isto, é necessário determinar valores de lambda alvo, e isso irá mudar de acordo com o regime de trabalho do motor. Quando o motor está trabalhando em baixa carga, ou seja, valores de MAP entre -0,6 bar e -0,4 bar e rotações mais baixas (entre 1000 e 3000rpm), deseja-se obter um valor Lambda mais próximo de valores da estequiometria ( $\lambda = 1,00$ ), para que o motor seja mais econômico. Quando o motor está em cargas mais altas ou em plena carga com rotações mais elevadas, é necessário ter um valor de mistura mais rica, para suprir o motor energeticamente e manter a câmara de

combustão em temperaturas normais, pois se nessas condições o valor de mistura estiver pobre ou muito próxima de estequiométrica, o motor sofrerá com perda de potência e aumento na temperatura da câmara de combustão, o que pode levar a falha de componentes internos do motor.

A figura 4.33 mostra o mapa de alvos dos valores de lambda em malha fechada, ou seja, o ECU irá corrigir o tempo de injeção em determinado regime de trabalho (MAP x RPM) até alcançar o valor programado nesta tabela. Os mapas principais de injeção precisam ser programados para que os valores de lambda sejam sempre o mais próximo do que é programado no mapa de alvos de lambda, para que a correção de injeção por malha fechada seja mínima. Quanto menor a porcentagem de correção de tempo de injeção, melhor a calibragem do ECU. Note que em um regime de baixa carga, por exemplo, valor de MAP a -0,40 bar e rotação do motor a 2500 rpm, o valor de sonda alvo é 0,90  $\lambda$ , próximo do valor de estequiometria. Em um regime de alta carga (exemplo: MAP em 0,00 bar e 6000 rpm) o motor trabalha com uma mistura de 0,85  $\lambda$ , mistura rica o suficiente para o máximo de potência e segurança para o motor.

Figura 4.33 – Mapa de alvos de valores de lambda em malha fechada

Mapa de alvos de malha fechada ( $\lambda$ )		RPM ( rpm )															
		$\lambda$	1000	1500	2000	2500	3000	3500	4000	4500	5000	5500	6000	6500	7000	7500	8000
MAP ( bar )	0,00	0,920	0,908	0,855	0,853	0,850	0,850	0,850	0,850	0,850	0,850	0,850	0,850	0,850	0,850	0,850	0,850
	-0,10	0,925	0,912	0,859	0,856	0,853	0,853	0,853	0,852	0,852	0,852	0,852	0,852	0,852	0,852	0,852	0,852
	-0,20	0,930	0,927	0,863	0,860	0,856	0,856	0,855	0,855	0,854	0,854	0,854	0,854	0,854	0,854	0,854	0,854
	-0,30	0,935	0,931	0,877	0,873	0,869	0,868	0,868	0,857	0,856	0,856	0,856	0,856	0,856	0,856	0,856	0,856
	-0,40	0,950	0,936	0,891	0,887	0,882	0,881	0,880	0,859	0,858	0,858	0,858	0,858	0,858	0,858	0,858	0,858
	-0,50	0,975	0,940	0,905	0,900	0,895	0,894	0,893	0,871	0,870	0,870	0,870	0,870	0,870	0,870	0,870	0,870
	-0,60	0,990	0,975	0,959	0,944	0,948	0,937	0,925	0,894	0,892	0,892	0,892	0,892	0,892	0,892	0,892	0,892
	-0,70	0,990	0,975	0,959	0,944	0,948	0,937	0,925	0,894	0,892	0,892	0,892	0,892	0,892	0,892	0,892	0,892
	-0,80	0,990	0,985	0,969	0,954	0,958	0,947	0,935	0,904	0,902	0,902	0,902	0,902	0,902	0,902	0,902	0,902
	-0,90	0,991	0,985	0,969	0,954	0,958	0,947	0,935	0,904	0,902	0,902	0,902	0,902	0,902	0,902	0,902	0,902
	-1,00	1,000	0,994	0,976	0,969	0,961	0,959	0,946	0,934	0,921	0,911	0,911	0,911	0,911	0,911	0,911	0,911

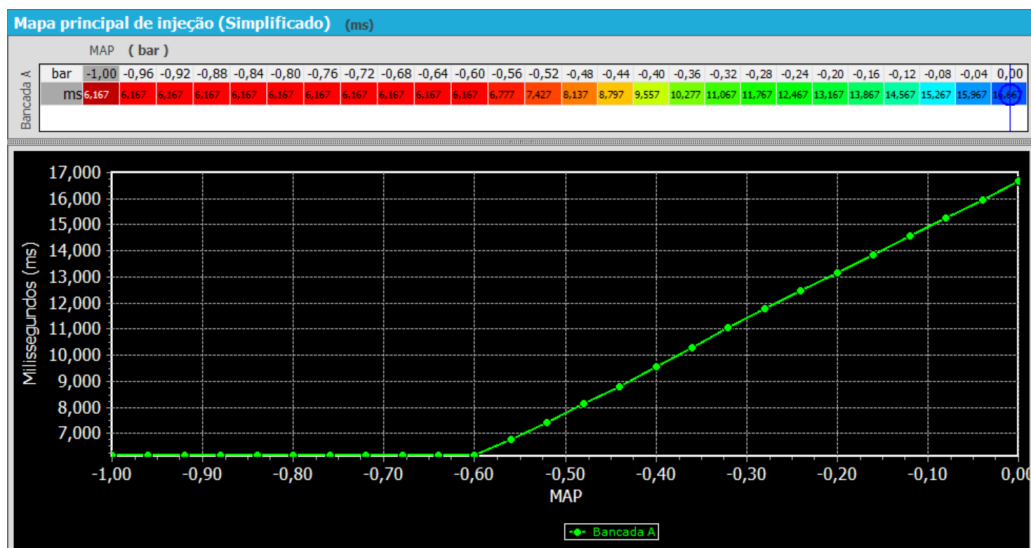
(Fonte: Autor, software FT Manager®, 2019)

Ao programar o mapa principal de tempo de injeção é necessário desativar o controle de combustível por malha fechada, para não haver diferenças no valor de lambda provenientes da correção. O software FT Manager permite programar o tempo de injeção de duas formas,

uma é dividindo o mapa de injeção nos dois parâmetros, de valor do sensor MAP e rpm, assim criando duas tabelas para entrar com valores de tempo de injeção que são automaticamente interpolados pelo software.

A figura 4.34 mostra a versão simplificada do mapa de injeção principal, e não considera o parâmetro de rotação de motor. O motor M50TUB25 mantém um valor de vácuo em 0,60 bar em marcha lenta, observe no gráfico que o tempo de injeção é constante até esse valor, a partir daí o tempo de injeção cresce de maneira linear até plena carga (MAP = 0,00 bar). Isto porque o motor precisa de mais combustível a maneira que a carga cresce, desta forma garantindo os valores alvo de mistura ar/combustível. Esta tendência de crescimento linear é observado em todos os motores a pistão naturalmente aspirados, variando a inclinação da reta de acordo com a eficiência do motor volumétrica do motor.

Figura 4.34 – Mapa principal de injeção simplificado do motor BMW



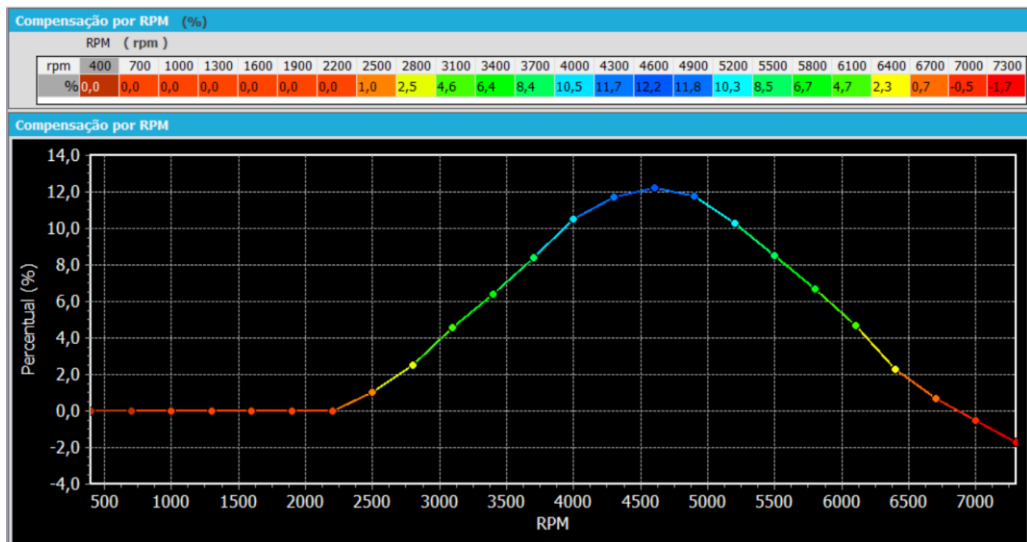
(Fonte: Autor, software FT Manager®, 2019)

O mapa de injeção por rpm do motor M50TUB25 é apresentado na figura 4.35, onde o tempo de injeção depende apenas da velocidade do motor. O formato desta curva é uma imagem da curva de torque gerada pelo motor, o ponto máximo da curva, que representa o maior tempo de injeção, aproxima-se da rotação de torque máximo do motor. No motor BMW em estudo, este pico ocorre entre 4600 rpm e 4700 rpm, que é exatamente onde o motor apresenta maior rendimento volumétrico.

Conforme explica (HEYWOOD, 1988), quando o motor está em baixas rotações, sua eficiência volumétrica é baixa, pois o motor não tem velocidade ótima para admitir a maior

quantidade de mistura ar/combustível o possível, apesar de o tempo em que as válvulas permanecem abertas é relativamente grande. À medida que a rotação aumenta, esta relação de velocidade de giro do motor e tempo de abertura de válvulas de admissão tende a se torna mais otimizada, ganhando eficiência volumétrica, por isto é necessário injetar mais combustível (inclinação positiva da curva), até atingir este pico de eficiência. Após atingir este pico, o motor começa a perder eficiência volumétrica, pois ao aumentar a velocidade do motor, o tempo de abertura de válvulas diminui, perdendo a capacidade de admitir a quantidade de mistura ar/combustível gerada no pico de torque, e assim segue com uma inclinação negativa da curva, até que seja necessário retirar combustível (a partir de 7000 rpm), pois a eficiência volumétrica cai drasticamente.

Figura 4.35 – Mapa de injeção de correção por rpm do motor BMW



(Fonte: Autor, software FT Manager®, 2019)

Para calibração do mapa principal de injeção mostrado na figura 4.34, é necessário fazer o motor operar com cargas diferentes em uma rotação fixa, onde não haja correção por rotação do motor (conforme figura 4.35). Na prática, coloca-se o veículo em um dinamômetro, fixa-se a rotação do motor em 2000 rpm e cria-se carga aplicando freio no dinamômetro de rolos ou no próprio carro. O motor é forçado a trabalhar em diferentes cargas por um tempo suficiente para leitura do valor de lambda, então ajusta-se o tempo de injeção até atingir o valor alvo.

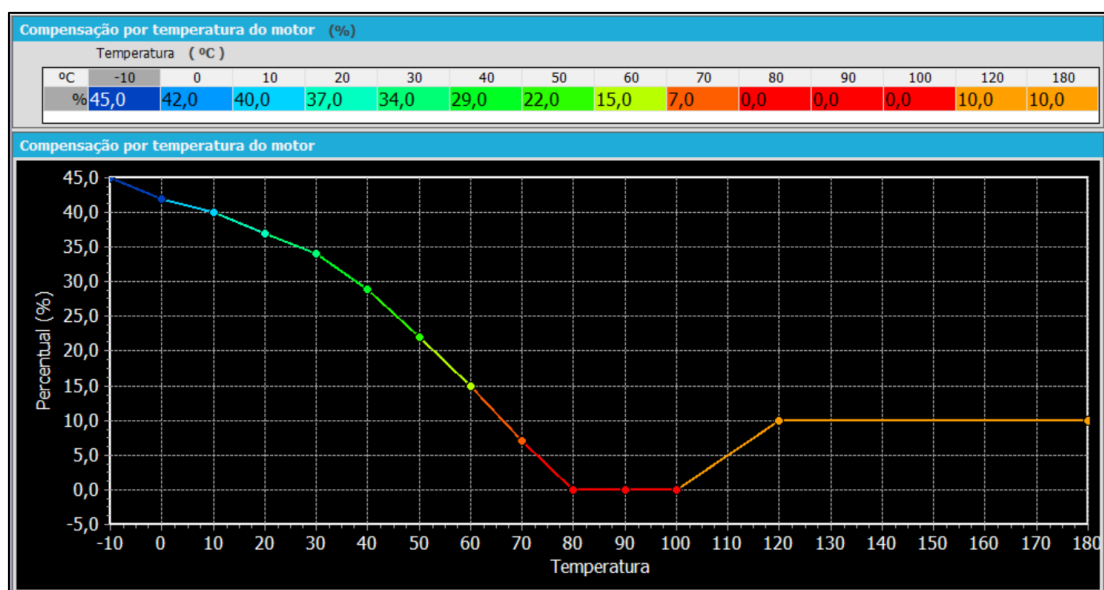
Após calibrado o mapa de injeção por valor de vácuo, faz-se a calibração do mapa de correção por rpm. Com o veículo em dinamômetro de rolo, o teste é iniciado em 1500 rpm, ativa-se o datalogger para coleta de dados e inicia-se aceleração com 100% de abertura de borboleta, em plena carga (com valor de MAP em 0,00 bar), até o corte de ignição, a 6500 rpm.

Analisa-se os dados coletados pelo datalogger, os principais sinais a serem observados neste teste são rotação do motor e valor de lambda. A cada faixa de rotação verifica-se o valor de lambda e corrige-se o tempo de injeção no mapa de correção por rpm por aquela dada rotação, até atingir o valor de lambda adequado, de acordo com o mapa de alvos de malha fechada.

O mapa de tempo de injeção principal completo, com referência ao valor de pressão absoluta e rotação do motor é mostrado no Apêndice G. Este mapa cobre todos as condições possíveis de funcionamento do motor. Este mapa ajuda a refinar o ajuste de tempo de injeção em situações diversas, e pode ser modificado em cada célula.

As compensações de tempo de injeção por temperatura são essenciais para manter os parâmetros de leitura de sonda lambda em diversas condições de funcionamento. A compensação por temperatura de motor, mapa mostrado na figura 4.36, baseia-se em porcentagem do tempo de injeção, qualquer que seja o tempo de injeção vindo do mapa principal, este tempo é alterado de acordo com o percentual mostrado no gráfico. A temperatura normal de trabalho do motor BMW (e de motores em gerais) é considerado no intervalo de 80°C a 100°C, portanto nestas condições não há correção. Quando o motor está em temperaturas mais baixas, a mistura é enriquecida, pois o motor consegue admitir ar mais frio, portanto mais denso, capaz de misturar mais combustível. Em temperaturas mais altas, a mistura é enriquecida para resfriar a temperatura na câmara de combustão, ajudando o motor a retornar ao seu regime de temperatura normal.

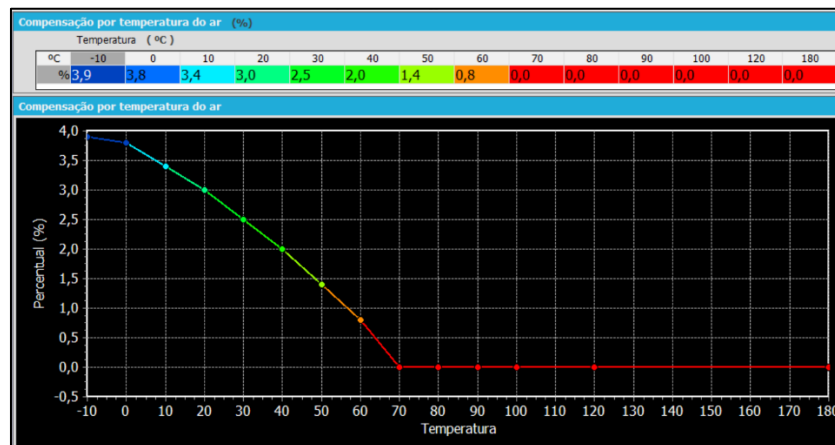
Figura 4.36 – Compensação de injeção por temperatura do motor BMW



(Fonte: Autor, software FT Manager®, 2019)

A temperatura do ar de admissão influi diretamente na capacidade de o motor misturar ar e combustível. Temperaturas mais baixas permitem misturar mais combustível com o mesmo volume de ar, que está mais denso. A figura 4.37 mostra o mapa de compensação de combustível por temperatura do ar, que também é dada por porcentagem, de forma análoga a compensação por temperatura de motor. Observe que em temperaturas inferiores a 70°C, foi programado para que o ECU compense de 3,9% a 1,4% do tempo de injeção do combustível, compensações muito menores das vistas no gráfico da figura 4.36. Este limite de 70°C é determinado por propriedades físico-químicas do etanol (se torna mais volátil a temperaturas superiores a esta, formando uma mistura mais homogênea de ar/combustível), e é configurado de forma experimental analisando o funcionamento do motor em várias faixas de temperatura. Não foi possível experimentar temperaturas inferiores a 20°C (os quais foram estimadas), porém estas temperaturas dificilmente serão experimentadas pelo veículo.

Figura 4.37 – Compensação de combustível por temperatura do ar de admissão do motor BMW

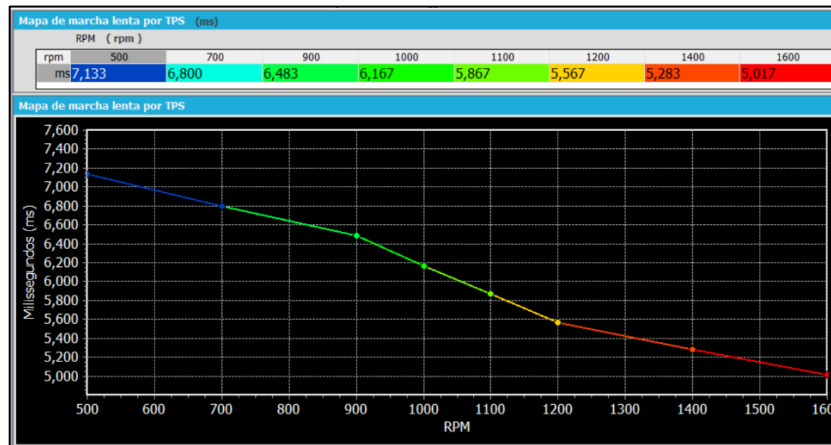


(Fonte: Autor, software FT Manager®, 2019)

O ECU detecta condição de funcionamento de marcha lenta quando o sinal do sensor de borboleta do acelerador (TPS) é estável em 0% e a rotação do motor está abaixo de 1600 rpm e acima de 500 rpm (considera-se o 400rpm como rotação de partida do motor). Ao detectar estas condições, o controle de tempo de injeção será feito pelo mapa de controle de marcha lenta (Figura 4.38). A velocidade normal de rotação do motor em regime de marcha lenta é configurada em 900 rpm e o valor alvo de sonda lambda nessa condição é 0,99λ, então as estratégias de tempo de injeção fazem com que esta rotação se mantenha. Observe no gráfico que em rotações abaixo de 900 rpm, o tempo de injeção aumenta, para que retome a velocidade normal, e em velocidades maiores, o tempo de injeção diminui, para que o motor perca potência

momentaneamente e reduza a velocidade, até atingir a rotação normal. O controle de lenta é ajudado também pelo avanço de ignição e atuador de controle de lenta (que controla o ar que entra no motor neste regime).

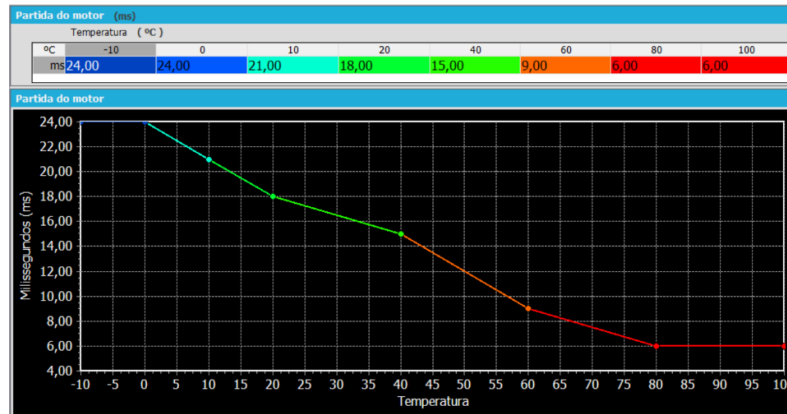
Figura 4.38 – Mapa de controle de injeção em marcha lenta do motor BMW



(Fonte: Autor, software FT Manager®, 2019)

A correta calibração do tempo de injeção de partida é importante para a usabilidade do veículo. Calibra-se o tempo de injeção de partida de acordo com a temperatura do motor, observando o valor lido pela sonda lambda (valores entre  $0,85\lambda$  e  $0,95\lambda$ ) e o tempo para dar a partida. Gráfico da figura 4.39 é o mapa de tempo de injeção de combustível na partida do motor M50TUB25, observe que quando o motor já está aquecido a temperatura normal de trabalho, acima de  $80^{\circ}\text{C}$ , o tempo de injeção de partida é muito aproximado ao tempo de injeção em baixa carga de motor, ou em regime de marcha lenta. Em temperaturas mais baixas, consideradas partida a frio, é necessário injetar mais combustível para ajudar na combustão inicial do motor, causando uma combustão mais forte para tirar o motor da inércia. Esta calibração é feita dando partida no motor em diversas temperaturas, experimentando diferentes tempos de injeção e observando o tempo e facilidade para dar a partida.

Figura 4.39 – Tempo de injeção de partida do motor BMW



(Fonte: Autor, software FT Manager®, 2019)

#### 4.8. CONFIGURAÇÃO DE MAPA DE AVANÇO DE PONTO DE IGNIÇÃO

Segundo (LIMA, 2017), o fator limitador no valor máximo de avanço do ponto de ignição é a resistência a detonação (octanagem) do combustível utilizado. Quanto maior a octanagem, maior poderá ser o atraso no momento da queima do combustível na câmara de combustão, pois o combustível irá resistir por mais tempo a combustão na pré-ignição. Neste projeto, o combustível utilizado no motor passa de gasolina comum, com 87 octanas, para etanol, com 110 octanas, por isto, pode-se explorar muito mais à vontade o atraso do ponto de ignição sem haver o prejuízo de pré-ignição.

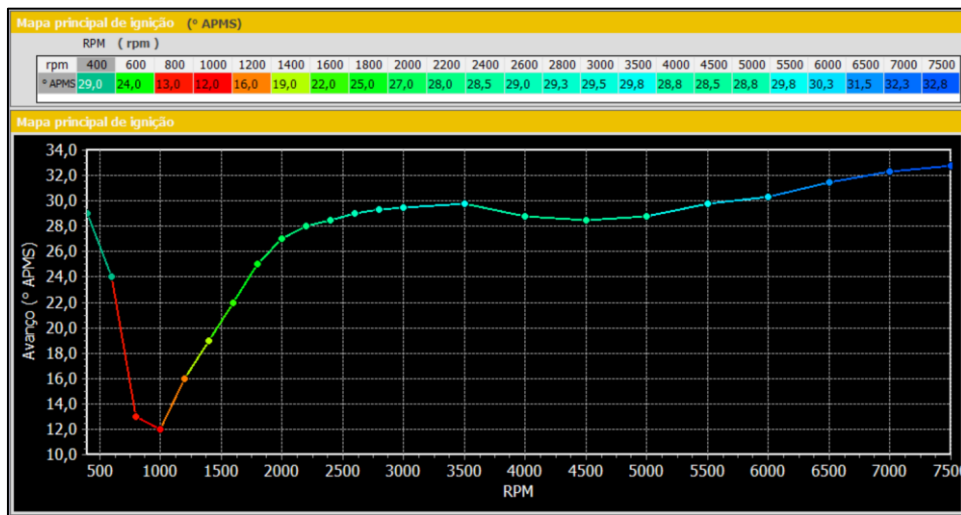
Assim como no mapa principal de injeção, o mapa principal de ignição é baseado em duas variáveis, a pressão no coletor de admissão (MAP em bar) e a velocidade de rotação do motor, porém o software simplifica este mapa da mesma forma, dividindo o gráfico em duas curvas, dependente da rotação do motor e outra dependente do sinal de MAP. A figura 4.40 mostra o mapa principal de ignição baseado em rpm, compare este com o mapa apresentado na figura 2.8 no capítulo 2, e observe que o mapa de ignição do motor a gasolina tem um avanço menor em todas as faixas de rotação. O mapa do motor a etanol possui em média 4° a mais de avanço, isto é o que resulta no aumento de potência e torque em motor a etanol comparado ao mesmo motor a gasolina.

O veículo opera em marcha lenta com avanço de ponto de ignição abaixo dos 12° antes do ponto morto superior em rotações entre 900 rpm e 1000 rpm, dependendo das condições de marcha lenta. Observe que no mapa, rotações abaixo destas saltam o avanço de ponto de ignição, isto é para fazer com que o motor volte a rotação normal (acima dos 900 rpm) caso sua rotação caia. À medida que a rotação aumenta, de 1000 rpm a 2000 rpm, a curva de avanço é



bastante íngreme para compensar a falta de eficiência volumétrica, de 2000 rpm a 3500 rpm, esta inclinação cai, pois o motor ganha eficiência volumétrica. A partir deste ponto, os valores de avanço caem, formando esta concavidade de 3500 a 5500 rpm, pois é a região de maior eficiência volumétrica (com pico por volta de 4500 a 4700 rpm). Quando o motor volta a perder eficiência volumétrica (a partir de 5500 rpm), aumenta-se o avanço de forma crescente até o corte de rotação. Esta estratégia ajuda o motor a desenvolver velocidade de forma linear e gerar uma curva de torque e potência sem falhas. Todos os valores em graus são dados antes do ponto morto superior (APMS).

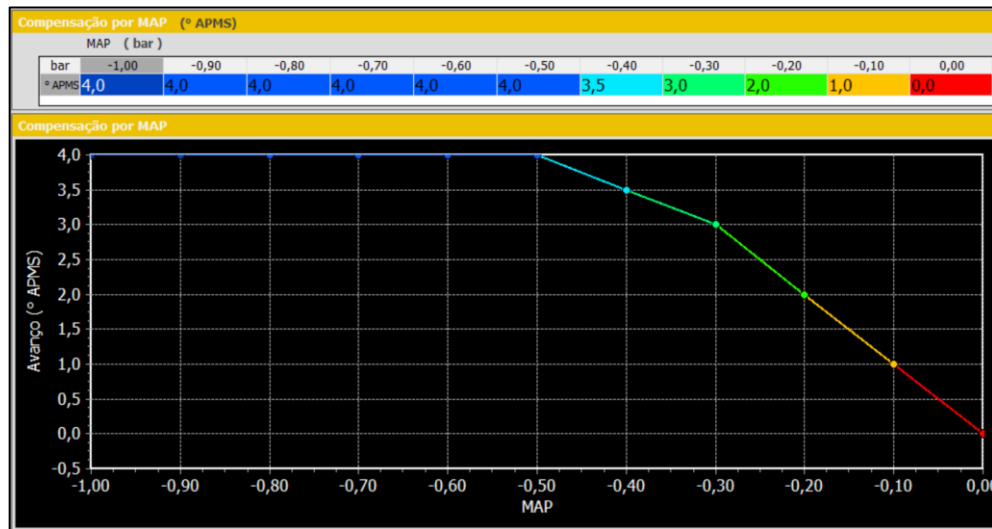
Figura 4.40 – Mapa principal de ignição do motor BMW



(Fonte: Autor, software FT Manager®, 2019)

Na figura 4.41 é apresentado o gráfico de compensação de avanço de ponto de ignição por sinal de MAP. Em condições normais, o veículo opera no intervalo de -0,60 bar a 0,00 bar, que é dividido em baixa, média e plena carga. Nas regiões de baixa carga, a ECU compensa o avanço de ignição adicionando 4 graus de avanço e relação ao mapa principal, isto faz com que o veículo consuma menos combustível, uma vez que foi observado em dinamômetro que ao crescer o avanço de ignição em baixas e médias cargas, foi necessário diminuir o tempo de injeção de combustível para manter a mistura ar/combustível programada. Em plena carga (valor de MAP em 0,00 bar), não há correção de avanço, o ECU consulta diretamente o mapa principal.

Figura 4.41 – Compensação de ponto de ignição por MAP do motor BMW



(Fonte: Autor, software FT Manager®, 2019)

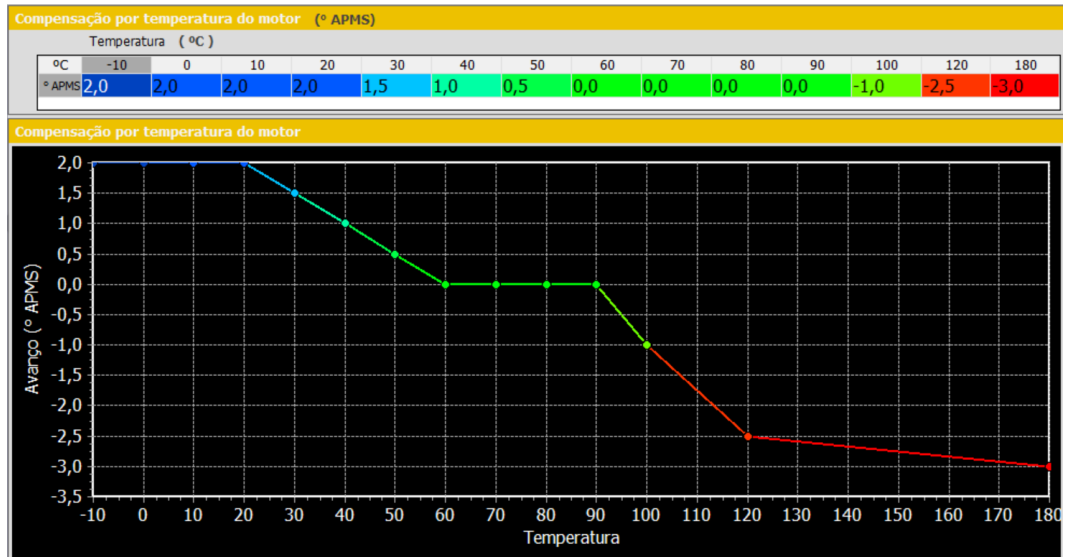
Da mesma forma que há correção de tempo de injeção por temperatura de motor e ar, há correção do avanço de ponto de ignição com estes parâmetros. A figura 4.42 mostra o gráfico de correção de ponto de ignição por temperatura do motor. Considera-se a temperatura normal de trabalho o intervalo de 60°C e 90°C, portanto não há correção nesta região. Em temperatura mais baixas, adiciona-se avanço de ponto de ignição em relação ao mapa principal, isto porque a câmara de combustão está em temperaturas mais baixas, o que permite que o ponto de ignição aconteça mais atrasado, isto gera mais potência na queima do combustível, e também aumenta a temperatura da câmara de combustão, o que ajuda o motor a chegar em sua temperatura normal de trabalho.

A partir de 100°C, é necessário diminuir o avanço do ponto de ignição em relação ao mapa principal, pois nestas condições, a temperatura da câmara de combustão é mais alta, o que pode ocasionar pré-ignição, uma ignição espontânea devido a altas temperaturas, isto pode ocasionar estresse elevado nas peças internas do motor, como anéis de seguimento, válvulas e pistões (isto se torna mais crítico quando o motor está em temperaturas mais altas, acima de 120°C). Ao diminuir o avanço do ponto de ignição, garante-se que a ignição irá ocorrer de fato pela centelha da vela e por consequência diminui-se a temperatura na câmara de combustão, isto pode ajudar o motor a voltar a sua temperatura normal de trabalho.

De forma similar é feito a compensação por temperatura do ar. Neste caso, o que torna a temperatura da câmara de combustão mais alta ou mais baixa é a da mistura ar/combustível, então é feita a compensação em relação ao mapa principal. Quando as temperaturas são mais

baixas (abaixo de 40°C), é possível explorar mais o avanço do ponto de ignição para extrair mais potência do motor.

Figura 4.42 – Compensação ponto de ignição por temperatura do motor BMW



(Fonte: Autor, software FT Manager®, 2019)

## 5. SÍNTESE CONCLUSIVA

### 5.1. CONCLUSÃO

O motor BMW M50TUB26 possui características mecânicas modernas mesmo tendo sido projetado no início da década de 90, principalmente por controlar injeção e ignição de modo sequencial e ter o recurso de comando variável. Estas vantagens podem de fato ser exploradas da melhor forma possível usando um sistema de controle de injeção eletrônica mais moderna e programável com um uso de um combustível de maior octanagem, como o etanol.

A facilidade que os sistemas de injeção eletrônica programáveis oferecem ao preparador de motores é extremamente vantajosa, pois permite o ajuste perfeito deste motor de acordo com suas características particulares e metas do projeto. A sequência seguida por este projeto pode ser seguida para qualquer motor e para qualquer finalidade do projeto, como por exemplo substituir sistema de carburação de um motor antigo para maior confiabilidade, desempenho e economia de combustível, ou para a construção de um protótipo fórmula de competição utilizando motor de moto, como o time que representa a UEA na competição nacional Formula SAE (o qual ajudei dando consultoria sobre o meu conhecimento no assunto).

### 5.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Sugiro que inicie o trabalho buscando na literatura o entendimento perfeito do funcionamento de um sistema de gerenciamento eletrônico de um motor a combustão interna. Isto ajudará a definir as necessidades do projeto em específico, e como o sistema do motor em estudo pode ser melhorado.

Busque também compreender sobre todos os parâmetros que controlam um motor, e como cada parâmetro e estratégias de programação podem afetar o funcionamento do motor. Recomendo buscar os cursos da FT Education ([www.fteducation.com.br](http://www.fteducation.com.br)), fiz o módulo 1 do curso de instalação, programação e acerto de injeções programáveis e pude entender todos os processos necessários para este tipo de projeto.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BOSCH, R. **Manual de Tecnologia Automotiva**. 25º ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2005. 1232 p.
- BRUNETTI, Franco. **Motores de Combustão Interna – Volume 1**. – São Paulo: Blucher 2012.
- CÂMARA, Júlio César Chaves. **Monitoramento Eletrônico da Mistura Ar / Combustível em Motores de Combustão Interna Ciclo Otto**. Universidade Federal da Bahia, 2017.
- CAPELLI, Alexandre. **Eletroeletrônica automotiva: Injeção eletrônica, arquitetura do motor e sistemas embarcados**. São Paulo: Érica, 2010.
- CARVALHO, Marcio Augusto Sampaio. **Avaliação de um motor de combustão interna ciclo otto utilizando diferentes tipos de combustíveis**. Universidade Federal da Bahia, 2018.
- Potential benefits and challenges**. Elsevier. Applied Thermal Engineering. 90 (2015)
- FERGUSON, C. R. **Internal combustion engines: applied thermosciences**. New York: John Wiley & Sons, 1986.
- GANESAN, V. **Internal Combustion Engines**. 1º ed. New York: McGraw - Hill, Inc., 1995.
- GIL, A. C. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. 6. ed. – São Paulo: Atlas, 2008.
- GUIMARÃES. Alexandre de Almeida. **Eletrônica Embarcada Automotiva**. São Paulo: Érica: 2007.
- HEYWOOD, John B. **Internal Combustion Engine Fundamentals**. 1º ed. New York: McGraw-Hill, Inc., 1988. 930 p.
- LAKATOS, E. M.; MARCONI, M. A. **Fundamentos da metodologia científica**. 5. ed. – São Paulo: Atlas, 2003.
- LIMA, Evandro Nabor de. **Injeção Eletrônica Programável**. 2. Ed. – São Paulo: Auto Tech, 2017.
- OBERT, Edward F. **Motores de Combustão Interna**. Rio Grande do Sul: Globo, 1971.

PRODANOV, C. C.; FREITAS, E. C. de. **Metodologia do trabalho científico: métodos e técnicas da pesquisa e do trabalho acadêmico**. 2. ed. – Novo Hamburgo: Feevale, 2013.

PUJATTI, Fabricio Jose Pacheco. **Desenvolvimento de um sistema de gerenciamento eletrônico para motores de ignição por centelha**. Universidade Federal de Minas Gerais, 2007.

**Websites:**

AEM Electronics. Disponível na Internet no site: <https://www.aemelectronics.com/>, acessado em 15/04/2019.

ANP -Agência Nacional de Petróleo. Disponível na Internet no site: <http://www.anp.gov.br>, acessado em 12/09/2018.

Autoentusiastas. Disponível na Internet no site: <http://www.autoentusiastas.com.br>, acessado em 13/09/2018.

Bosch Auto Parts. Disponível na Internet no site: <https://www.bosch-automotive-catalog.com/>, acessado em 18/09/2019

Bosch Auto Parts. Disponível na Internet no site: <https://www.boschautoparts.com/en/auto/fuel-injectors>, acessado em 27/04/2019

Cardiagn. Disponível na Internet no site: <https://cardiagn.com/bmw-3-series-e36-1992-1998-service-manual/>, acessado em 28/09/2019

Doutor IE. Disponível na Internet no site: <https://www.doutorie.com.br/>, acessado em 17/09/2019

Engine Basics. Disponível na Internet no site: <https://www.enginebasics.com/>, acessado em 13/07/2019

Faraway Racing. Disponível na Internet no site <http://www.farawayracing.com>, acessado em 22/03/2019.

Flatout. Disponível na Internet no site: <http://www.flatout.com.br>, acessado em 14/09/2018.

FuelTech. Disponível na Internet no site: <http://www.fueltech.com.br>, acessado em 14/09/2018.

IBT Plásticos. Disponível na Internet no site <http://www.ibtplasticos.ind.br/blog/tanques-soprados>, acessado em 28/03/2019.

InjePro. Disponível na Internet no site <http://www.injepro.com.br>, acessado em 04/03/2019.

Revista TechSpeed. Disponível na Internet no site: <http://www.revistatechspeed.com.br>, acessado em 14/09/2018.

Lowe Automobil. Disponível na Internet no site: <http://loeweautomobil.de/>, acessado em 08/07/2019

MTE – Thomson. Disponível na Internet no site <https://cursosonline.mte-thomson.com.br/unit/aula-01-introducao-aos-sistemas-de-injecao-e-ignicao-eletronica/>, acessado em 21/04/2019.

Pandoo. Disponível na Internet no site <http://www.pandoo.com.br>, acessado em 05/03/2019.

Perfect Power. Disponível na Internet no site: <https://www.perfectpower.com/>, acessado em 11/09/2019

Quatrorodas. Disponível na Internet no site: <https://www.quatrodordas.com.br/>, acessado em 08/04/2019.

SAE Brasil. Disponível na Internet no site: <http://portal.saebrasil.org.br/publicacoes>, acessado em 13/09/2018.

Senai. Disponível na Internet no site: <http://www.sp.senai.br/automobilistica>, acessado em 14/09/2018.

**APÊNDICE A** - Tabela de conversão de sensor de oxigênio de banda estreita para fator lambda e AFR.

0-1 volts Lambda				
Volts	Lambda	AFR Gasolina	AFR Metanol	AFR Etanol
0,477	1,41	20,67	9,07	12,61
0,492	1,29	18,83	8,26	11,49
0,506	1,19	17,49	7,67	10,67
0,521	1,13	16,54	7,26	10,09
0,535	1,08	15,87	6,96	9,24
0,55	1,03	15,14	6,64	9,12
0,566	1	14,7	6,45	8,97
0,579	0,98	14,31	6,28	8,73
0,594	0,96	14,03	6,16	8,56
0,608	0,94	13,75	6,03	8,39
0,623	0,92	13,47	5,91	8,22
0,637	0,9	13,19	5,79	8,05
0,652	0,88	12,91	5,66	7,88
0,666	0,87	12,69	5,57	7,74
0,681	0,85	12,46	5,47	7,6
0,695	0,84	12,24	5,37	7,47
0,71	0,82	12,02	5,27	7,33
0,724	0,81	11,8	5,18	7,2
0,739	0,79	11,57	5,08	7,06
0,753	0,77	11,35	4,98	6,93
0,768	0,76	11,13	4,88	6,79
0,783	0,74	10,9	4,78	6,65
0,797	0,73	10,68	4,69	6,52
0,812	0,71	10,46	4,59	6,38
0,826	0,7	10,23	4,49	6,24
0,841	0,68	10,01	4,39	6,11
0,855	0,67	9,079	4,3	5,97
0,87	0,66	9,6	4,21	5,86



0,884	0,64	9,39	4,12	5,73
0,899	0,62	9,15	4,01	5,58
0,913	0,61	8,94	3,92	5,46
0,928	0,59	8,71	3,82	5,31
0,943	0,58	8,5	3,73	5,19

(Fonte: Lima, 2017)

**APÊNDICE B** - Tabela de conversão de sensor de oxigênio de banda larga para fator lambda e AFR.

Wide Banda Lambda				
Volts 0-5	Lambda	AFR Gasolina	AFR Metanol	AFR Etanol
0	0,57	8,41	3,72	5,17
0,156	0,58	8,52	3,77	5,24
0,312	0,59	8,64	3,82	5,31
0,468	0,6	8,81	3,89	5,42
0,624	0,61	8,98	3,97	5,52
0,78	0,62	9,09	4,02	5,59
0,936	0,63	9,26	4,09	5,69
1,092	0,64	9,44	4,17	5,8
1,248	0,66	9,61	4,25	5,91
1,404	0,67	9,78	4,32	6,01
1,56	0,68	9,95	4,4	6,12
1,716	0,69	10,12	4,47	6,22
1,872	0,7	10,29	4,55	6,33
2,028	0,71	10,47	4,63	6,44
2,184	0,73	10,69	4,72	6,57
2,34	0,75	10,92	4,83	6,71
2,496	0,76	11,15	4,93	6,85
2,652	0,78	11,38	5,03	7
2,808	0,8	11,67	5,16	7,17
2,964	0,82	11,95	5,28	7,35
3,12	0,84	12,24	5,41	7,52
3,276	0,86	12,58	5,56	7,73
3,432	0,88	12,92	5,71	7,94

3,588	0,91	13,27	5,86	8,16
3,744	0,93	13,67	6,04	8,4
3,9	0,96	14,13	6,24	8,69
4,056	1	14,64	6,47	9
4,212	1,04	15,21	6,72	9,35
4,368	1,08	15,84	7	9,74
4,524	1,13	16,53	7,31	10,16
4,68	1,18	17,27	7,63	10,62
4,836	1,24	18,19	8,04	11,18
4,992	1,33	19,44	8,59	11,94

(Fonte: Lima, 2017)

**APÊNDICE C** – Ficha técnica do módulo de injeção eletrônica programável Fueltech FT500 LITE e FT500. (Fonte: Fueltech, 2019)

- **Injeção sequencial para até 20 injetores;**
- **Controle de ângulo de fase de injeção;**
- **Correção de injeção e ignição individual por cilindro;**
- Painel de instrumentos e de diagnósticos em tempo real através do software FT Manager;
- Conexão para cabo mini USB (não necessita Conversor USB-CAN para comunicação com o PC, backup de mapas e atualização);
- Programação em tempo real através do Software FT Manager;
- Tabela 3D de até 32x32 pontos para mapas de injeção e ignição;
- **Até 8 saídas de ignição para controlar sistemas trabalhando em centelha perdida ou bobinas individuais;**
- Resolução dos mapas configurável;
- **Escalas dos sensores configuráveis permitem compatibilidade com sensores originais, inclusive conexão em paralelo com a ECU original;**
- Entrada para sensor MAP externo permite utilizar o sensor MAP original ligado ao coletor de admissão, eliminando a necessidade de uso de uma mangueira para vácuo;

- Datalogger Interno com 128 canais, com taxa de amostragem de 25 a 200 Hz e capacidade para até 2h50min de gravação (24 canais a 25Hz);
- Compatível com motores de pistão e rotativos (2, 3 e 4 rotores, 1 a 12 cilindros);
- **Controle de injeção e ignição por distribuidor ou roda fônica;**
- **Controle de marcha lenta por motor de passo, ponto de ignição, borboleta eletrônica ou solenoide simples;**
- Funções e mapas de ajuste fino, desenvolvidos para aperfeiçoar o funcionamento do carro em diversas aplicações, proporcionando melhor dirigibilidade e conforto:
  - Ex.: primeiro pulso de partida, enriquecimento pós-partida, compensação por TPS ou MAP, integração dos controles de lenta, correção de tensão por bancada, tabela de lenta por TPS, combustível na desaceleração;
- Controle de borboleta eletrônica;
- 13 canais de entrada: 2 fixos (**RPM e sensor de fase**) e 11 totalmente configuráveis (**temperatura do ar, temperatura do motor, pressão de óleo, pressão de combustível, sonda lambda**, TPS, pedal eletrônico - 2 canais, borboleta eletrônica, **ar-condicionado**, two-step, contrapressão de escape, sensor de curso de amortecedor, temperatura dos gases de escapamento (requer FuelTech ETM-1), nível do tanque de combustível, etc.);
- Entrada diferencial para sensor de rotação;
- Até 8 saídas de injetores para controlar até 32 bicos de alta impedância. Se necessário, é possível configurar até 20 saídas de injetores usando um módulo FuelTech Peak and Hold;
- Até 20 saídas auxiliares totalmente programáveis (**bomba de combustível, eletro ventilador, comando variável, ar-condicionado**, entre outros);
- Sensor MAP integrado de 7 bar (absolutos) para motores aspirados ou turbo;
- 5 Memórias para gravar diferentes ajustes dos conjuntos de mapas;
- Controle de pressão de turbo por RPM com válvula N75;
- Injeção de nitro progressivo (seco/molhado);
- Proteção do módulo por senha;
- Conexão com dashboard FuelTech Racepak IQ3 utilizando a porta CAN integrada;

- Proteção do motor por sinal de detonação utilizando o FuelTech KnockMeter (vendido separadamente);
- Controle de tração ativo utilizando as velocidades de roda;
- Possibilidade de fazer cópias de segurança dos mapas no PC;
- Possibilidade de fazer atualizações via internet;
- Função de proteção do motor por até 10 alertas configuráveis;
- Função de corte de arrancada;
- Função de controle de rotação por tempo após arrancada.

**APÊNDICE D** – Ficha técnica do módulo de injeção eletrônica programável Fueltech FT550. (Fonte: Fueltech, 2019)

- Controle de motores ciclo Otto de 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 10 e 12 cilindros;
- Controle de motores Wankel de 2, 3 e 4 rotores;
- **Controle de injeção em modo sequencial**, semissequencial e multiponto;
- **Controle de ignição por roda fônica** ou distribuidor;
- **Controle de ignição em modo sequencial** ou centelha perdida;
- **Malha fechada de injeção por sensor de oxigênio (sonda lambda banda larga)**;
- Conectores automotivos AMP SUPERSEAL;
- Controle de borboleta eletrônica (Drive-By-Wire);
- Controle de marcha-lenta por ponto de ignição e atuadores (borboleta eletrônica, **motor de passo**, ou válvula PWM);
- Mapas programáveis em tempo real diretamente na tela ou através do software FTManager (que inclui acesso remoto).
- Gabinete em ABS polido e texturizado com proteção contra entrada de água
- Entrada diferencial para sinal de rotação;
- **Entrada para sinal de fase (incluindo sensores de fase com múltiplos dentes)**;
- 16 canais de entrada totalmente configuráveis – digitais e analógicas (sensores de temperatura, de pressão, de velocidade, de posição, TPS, MAP externo, botões, chaves, etc.);
- Entrada para sensor Flex-Fuel;

- 2 entradas com pré-amplificador de alto ganho normalmente usadas para sensor de força de alavanca (*strain gage*);
- Escala de leitura dos sensores editável;
- Sensor de aceleração e giroscópio integrado;
- Sensor MAP interno de 7 bar absolutos (1 bar relativo ao vácuo e 6 bar de pressão positiva);
- 1 porta USB para comunicação com o computador e software FuelTech;
- Total de 24 saídas configuráveis: (todas podem ser usadas para acionamentos auxiliares de bomba de combustível, **eletro ventilador**, válvulas ou injetores para BoostController, **comando variável** etc.);
- 12 saídas coletor aberto: recomendadas para injetores de alta impedância (até 4 injetores por saída) – é possível configurar até 24 saídas utilizando módulo externo FuelTech Peak and Hold;
- 8 saídas coletor aberto com fonte de corrente em 5V: recomendadas para ignição;
- 8 saídas PUSH-PULL ou HALF BRIDGE: recomendadas para ignição, acionamento de motor de passo, de borboleta eletrônica e de cargas ativadas por 12V;
- **Injeção sequencial para até 20 saídas;**
- Malha fechada de injeção por sensor de oxigênio (sonda lambda banda larga);
- 2 bancadas de injeção (Bancada A e B);
- Mapa principal por MAP ou TPS por RPM;
- Mapa principal 3D avançado de até 32x32 pontos (tamanho e índices dos mapas totalmente configuráveis);
- Ou mapa simplificado 2D de até 1x32 pontos por MAP ou TPS e correção por RPM de até 1x32 pontos (tamanho e índices dos mapas totalmente configuráveis);
- Resolução do tempo de injeção 0,001ms;
- Ajuste de injeção rápida e de decaimento;
- Ajustes individuais de injeção por cilindro por MAP ou RPM;
- Compensação de injeção por:
  - Temperatura do motor;
  - Temperatura do Ar;
  - Tensão da bateria (individual por bancada);
  - TPS ou MAP;

- Mapa de partida do motor por temperatura do motor;
- Primeiro pulso de partida;
- Enriquecimento de combustível após partida;
- Compensação de combustível por marcha;
- Compensação de combustível na troca de marcha;
- **Mapa de ângulo de fase de injeção;**
- Compensação de *deadtime* de injetores por tensão da bateria;
- **Ignição sequencial para até 12 cilindros;**
- Mapa principal por MAP ou TPS por RPM;
- Mapa principal 3D avançado de até 32x32 pontos (tamanho e índices dos mapas totalmente configuráveis);
- Ou mapa simplificado 2D de até 1x32 pontos por MAP ou TPS e correção por RPM de até 1x32 pontos (tamanho e índices dos mapas totalmente configuráveis);
- Resolução do ângulo de ignição 0,01°;
- Ajustes de ignição individuais por cilindro;
- Compensação de ponto de ignição por temperatura do ar;
- Compensação de ponto de ignição por temperatura do motor;
- Compensação de ponto de ignição por marcha;
- Compensação de ponto de ignição na troca de marcha.
- GearController integrado: corte de ignição para troca de marcha usando sensor de força na alavanca;
- BoostController integrado: controle de pressão na válvula wastegate;
- Controle de lenta por ponto e por motor de passo, válvula PWM ou borboleta eletrônica;
- Corte de combustível na desaceleração (*Cut-Off*);
- Acionamento de até dois eletroventiladores por temperatura do motor ou ar condicionado, sendo uma delas com capacidade de acionamento por PWM (soft start);
- Controle de acionamento de ar condicionado;
- Controle temporizado da bomba elétrica de combustível;
- Acionamento de comando de válvulas variável;
- Controle de nitro progressivo com enriquecimento de mistura e retardo de ponto de ignição;
- Saída auxiliar por PWM;

- Saída ativada por MAP;
- Saída ativada por RPM;
- Diferentes opções para detecção de marcha: Queda de rotação, sensor analógico, por pulso, por velocidade e relação de marcha, por saída de troca de marcha ou GearController;
- Botão de partida (START/STOP), permite ligar e desligar o motor através de uma saída com relé ligada ao motor de partida.
- Partida a frio com reservatório;
- **Controle de tração ativo** atua no motor a fim de manter o deslize (slip) em níveis ideais para a máxima tração utilizando a velocidade de referência do veículo e a velocidade de tração.
- **Método de controle de potência de alta resolução** para limitador de RPM. Controla o ponto de ignição em cada cilindro e reduz consideravelmente o tempo de carregamento do turbo. Permite utilizar RPM mais baixo ou maior pressão no mesmo RPM de arrancada, mantém os cilindros e as velas em condições de máxima eficiência, pois, os mantém secos, evita os cortes de ignição e ainda suaviza a operação o 2-step.
- Pit limit / Limitador de velocidade;
- **Saídas genéricas** permitem configurar até 8 saídas associando uma entrada e definindo de que forma a saída será ativada;
- Limitador de rotação por corte de combustível ou de ignição;
- Shift light com sinal sonoro com atuação no painel de instrumentos e shift light externo;
- Alertas com opções individuais de aviso, limitação de RPM ou corte do motor por:
  - Alta temperatura no escape (EGT), baixa temperatura no escape (EGT), batente de malha fechada de injeção, pressão excedida, rotação excedida, temperatura do motor, injetores saturados, pressão de óleo, pressão de combustível, pressão diferencial de combustível;
- Edição dos mapas em tempo real;
- Edição dos índices das tabelas dos mapas;
- Salvar e ler mapas salvos no PC;
- Abrir mapas embutidos em logs;
- Exibição dos mapas de combustível em ms, % VE, %DC e lb/h;
- Facilidade na edição dos controles por tempo, organizando todos em uma tela e possibilitando a utilização de um log para referência;

- Edição do ProNitro auxiliado pelo gráfico dos estágios;
- Analisar o funcionamento do motor em tempo real, através de gauges e gráficos com opção de tela cheia;
- Verificar as mensagens de alerta ou status;
- Testar as funções controladas por tempo;
- Editar os canais que serão logados e suas taxas individuais;
- Alterar entre mapas simples (2D) ou avançados (3D).

**APÊNDICE E** - Ficha técnica e tabela comparativas de módulos de injeção Injepro SFI6 E S8000.

Tabela comparativa	S8000	SFI6 PRO
Rotação máxima	30000	20000
Correção de sonda	Banda larga ou banda estreita	Banda larga ou banda estreita
Map integrado	-1 bar até 6,00 bar	-1 bar até 6,00 bar
Mapa de injeção	Simplificado ou completo	Simplificado ou completo
Banca de injetores	8 injetores	6 injetores
Modo de injeção	Sequencial até 8 cil. ou semissequencial até 12 cil.	Sequencial até 6 cil. ou semissequencial até 12 cil.
Controle de <i>dead time</i>	Sim	Sim
Mapas	Memória para 4 mapas	Memória para 5 mapas
Sinal de rotação	Roda Fônica ou distribuidor	Roda Fônica ou distribuidor
Aplicação em motores (Ciclo Otto)	Pistão de 1 a 12 cilindros	Pistão de 1 a 12 cilindros
Sensor de rotação	Indutivo ou Hall	Indutivo ou Hall
Aplicação em motores (Rotativo)	Até 3 rotores	Até 3 rotores
Modo de ignição	Sequencial até 8 cil. ou Semissequencial até 12 cil.	Sequencial até 8 cil. ou Semissequencial até 12 cil.
Fase de comando	Indutivo ou Hall	Indutivo ou Hall



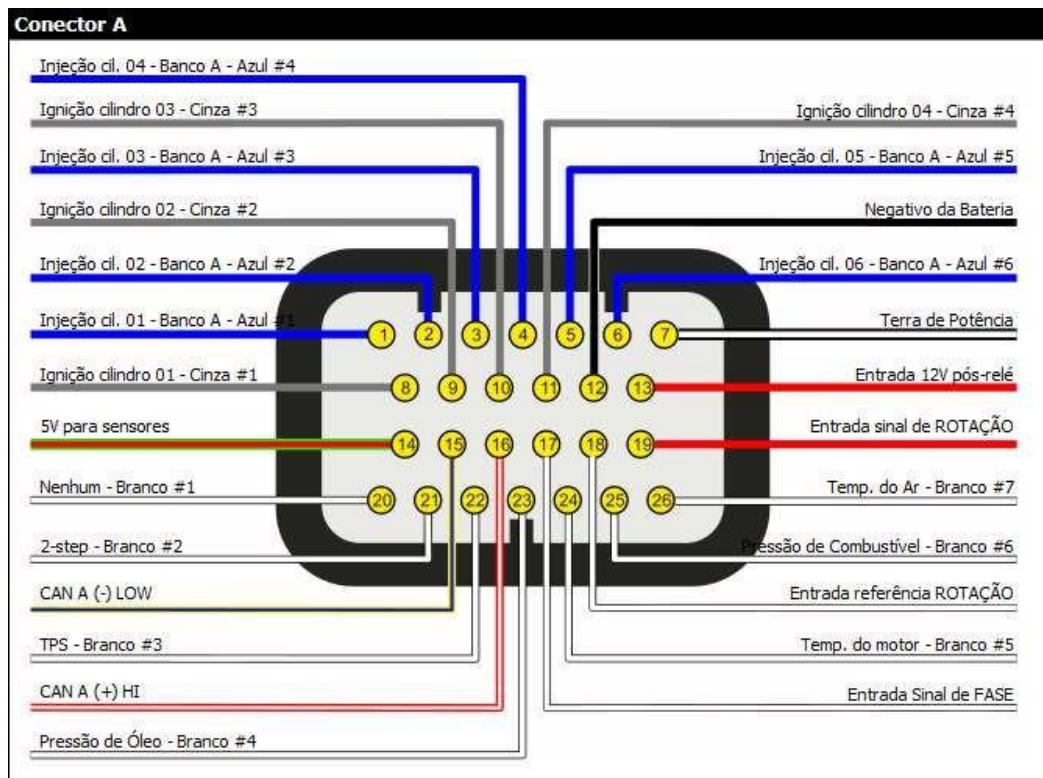
Sinal de ignição	ISD / Bobina com Ignição ou MSD / Sinal Negativo	ISD / Bobina com Ignição ou MSD / Sinal Negativo
Controle de DWELL	Inicial e final	Inicial e final
Mapa de ignição	Completo ou simplificado	Completo ou simplificado
Correção de injeção na partida por temperatura	Sim	Sim
Correção de injeção por temperatura do motor	Sim	Sim
Correção de injeção por temperatura do ar	Sim	Sim
Correção de injeção por tensão de bateria	Sim	Sim
Correção de injeção por MAP	Sim	Sim
Correção de ângulo de injeção por RPM	Sim	Sim
Correção de injeção individual por cilindro	Sim	Sim
Correção de injeção por TPS	Sim	Sim
Correção de injeção por RPM	Sim	Sim
Ajuste rápido de injeção total em %	Sim	Sim
Correção de injeção após partida	Sim	Sim
Correção de ignição por temperatura do motor	Sim	Sim
Mapa de ignição na lenta	Sim	Sim
Correção de ignição na partida por temperatura	Sim	Sim
Correção de ignição por temperatura do ar	Sim	Sim
Correção de ignição por MAP	Sim	Sim
Correção de ignição por TPS	Sim	Sim
Ajuste rápido de ignição	Sim	Sim
Ajuste de ignição individual por cilindro	Sim	Sim

Anti-lag	Sim	Sim
Alerta por rotação	Sim	Sim
Alerta por pressão	Sim	Sim
Alerta por temperatura do motor	Sim	Sim
Alerta por pressão de combustível	Sim	Sim
Alerta para rotação do Shift-Light	Sim	Sim
Controle de comando variável	Sim	Sim
Alerta por abertura de injetor	Sim	Sim
Alerta por pressão de óleo	Sim	Sim
Alerta por falta de fase	Sim	Sim
Controle de <i>booster</i>	3 estágios	3 estágios
Controle de tração por ponto de ignição com 5 estágios	Sim	Sim
Corte de aquecimento	Sim	Sim
Controle de nitro	Sim	Sim
Controle de tração por destracionamento	Sim	Sim
Controle de arrancada	Sim	Sim
Corte de combustível (Cut-Off)	Sim	Sim
Controle de eletroventilador com 2 estágios	Sim	Sim
Limitador de rotação (Combustível)	Sim	Sim
Limitador de rotação	Sim	Sim
Compatível com sonda	Sim	Sim
Entradas de sensores externo	Sim	Sim
Dashboard (Racepak)	Sim	Sim
Entradas configuráveis	Sim	Sim
Controle de corpo de borboleta eletrônico integrado ou motor de passo	Sim	Sim

Controle de marcha lenta por solenoide	Sim	Sim
Dashboard (AIM)	Sim	Sim
Saídas configuráveis	Sim	Sim
Datalogger integrado	Sim	Sim
Atualização via internet (Hardware e Software)	Software e firmware	Software e firmware
Modo tempo real	Sim	Sim
Assistente de configuração pelo software	Sim	Sim
EGS Incorporado	Sim	Não
EBC Incorporado	Sim	Não

(Fonte: Injepro, 2019)

**APÊNDICE F** – Diagrama de ligação de chicote FT550



(Fonte: Autoria própria, software FT Manager®, 2019)

