



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Faculdade de Engenharia
Programa de pós-graduação em Engenharia Mecânica

Emerson Alves da Silva

MEDIÇÃO NÃO INVASIVA
DO CONSUMO DE COMBUSTÍVEL EM MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA
BASEADOS NO CICLO OTTO

Belo Horizonte

2020

Emerson Alves da Silva

**MEDIÇÃO NÃO INVASIVA
DO CONSUMO DE COMBUSTÍVEL EM MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA
BASEADOS NO CICLO OTTO**

Versão final da Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Área de Concentração: Projetos e Sistemas
Orientador: Prof. Dr. Antônio Augusto Torres Maia
Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG

Belo Horizonte

2020

S586m

Silva, Emerson Alves da.

Medição não invasiva do consumo de combustível em motores de combustão interna baseados no ciclo otto [recurso eletrônico] / Emerson Alves da Silva. - 2020.

1 recurso online (88 f. : il., color.) : pdf.

Orientador: Antônio Augusto Torres Maia.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Bibliografia: f. 84-88.

Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.

1. Engenharia mecânica - Teses. 2. Automóveis - Consumo de combustíveis - Teses. 3. Automóveis - Motores - Sistemas de injeção eletrônica de combustível - Teses. 4. Motores de combustão interna - Teses. I. Maia, Antônio Augusto Torres. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 621 (043)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA

Av. Antônio Carlos, 6627 - Campus Universitário
31270-901 - Belo Horizonte - MG
Tel.: +55 31 3409.5145
E-mail: cpgmec@demec.ufmg.br

**"MEDIÇÃO NÃO INVASIVA DO CONSUMO DE COMBUSTÍVEL EM
MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA BASEADOS NO CICLO
OTTO"**

EMERSON ALVES DA SILVA

Dissertação submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de "**Mestre em Engenharia Mecânica**", na área de concentração de "**Projeto e Sistemas**".

Dissertação aprovada no dia 14 de fevereiro de 2020.

Por:

Prof. Antonio Augusto Torres Maia
Orientador - Departamento de Engenharia Mecânica/ UFMG

Prof. Jose Guilherme Coelho Baeta
Departamento de Engenharia Mecânica/ UFMG

Prof. Andre Guimaraes Ferreira
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

*À MINHA ESPOSA SYLVIA, AOS MEUS FILHOS MATHEUS, LAURA E JOÃO E
AOS MEUS PAIS SÔNIA E LINDENOR (in memoriam), QUE SEMPRE ACREDITARAM
MUITO EM MIM E NO MEU TRABALHO.*

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais que tudo fizeram para garantir um caminho de vida calcado nos estudos e no esforço perseverante para mim e para meus irmãos.

Ao meu orientador, professor Dr. *Antônio Augusto Torres Maia*, por ter me dado a oportunidade de trabalhar com ele nesta pesquisa, acreditando que eu teria a capacidade para tal, dando força e compreensão nas dificuldades encontradas durante o desenrolar do trabalho, e pela amizade formada entre nós neste período.

Ao professor Dr. *José Guilherme Coelho Baeta*, que me deu todo apoio necessário para os testes que comprovaram a eficácia da metodologia proposta neste trabalho, abrindo as portas do Laboratório do CTM, disponibilizando todos os recursos materiais e humanos que a pesquisa requisiou.

Ao professor Dr. *André Guimarães Ferreira*, pelas conversas que trouxeram esclarecimentos teóricos envolvidos no modelamento matemático do problema abordado em meu trabalho.

Aos amigos e colegas do programa de pós-graduação da Engenharia Mecânica que sempre me ajudaram nessa caminhada, compartilhando suas experiências e esforços, em especial à equipe de operação do CTM-UFMG, *Rodrigo Fonseca*, *Alysson Fernandes Teixeira*, *Fernando Antonio Rodrigues Filho*, dentre outros.

Ao amigo *Edson Ribeiro de Castro*, laboratorista do LAC-Laboratório de Automação e Controle da UFMG, pois além de se mostrar um grande amigo, ajudando a pensar no circuito protótipo, nos recursos de hardware que teria, nas melhorias até chegarmos na versão final do circuito etc. Muito obrigado por compartilhar comigo sua experiência profissional e por ter sido tão comprometido no seu incansável desejo de ajudar as pessoas.

Aos meus filhos que, cada um à sua maneira, soube contribuir comigo para a realização desse trabalho e muitas vezes privando-se de minha presença.

À minha esposa que soube fazer minhas vezes nos momentos em que eu era requisitado na vida em família e precisei me dedicar às pesquisas.

Aos meus colegas de trabalho do CEFET-MG que, com entusiasmo, compartilharam suas experiências pessoais e dificuldades vencidas e me animaram a perseverar no caminho.

Meus sinceros agradecimentos.

RESUMO

Este trabalho abarca o desenvolvimento de uma metodologia para o monitoramento e medição do consumo de combustível em motores de combustão interna baseados no Ciclo Otto dotados de sistema de injeção do tipo *Common Rail*, em teve como objetivos o compromisso de ser não invasiva, de ser montada com eletrônica de baixo custo, e de apresentar níveis de precisão competitivos em relação a outras técnicas de medição existentes. Desse modo, o processo de medição é realizado sem cortes nos condutores elétricos, inserções de componentes nos circuitos originais do veículo, ou mesmo contato direto com o fluido combustível, preservando as características originais do veículo. A técnica propõe a medição dos sinais elétricos enviados da central eletrônica do veículo para os eletro-injetores de combustível. Assim, o tempo de injeção são todos registrados e convertidos em massa de combustível utilizando-se de um coeficiente de calibração previsto na equação de modelamento e encontrado através de um critério proposto nesta pesquisa. A eficácia da metodologia proposta foi testada em um Motor de Pesquisa de Cilindro Único (SCRE), dotado de toda instrumentação necessária para avaliar a efetividade do sistema. Foram realizados trinta e dois testes, considerando quatro diferentes cargas no eixo do motor, quatro diferentes velocidades de rotação, e dois diferentes tipos de combustível, o Etanol puro (E100) e a mistura de Gasolina e Etanol a 27% (E27). Os resultados foram avaliados em termos de erros percentuais, decorrentes do desvio entre os valores observados nas medições das massas finais consumidas registradas pela balança gravimétrica (referência) e a massa final mensurada pelo protótipo. Os erros percentuais obtidos se mostraram menores que os apontados pela literatura em sensores do tipo eletromecânicos, sendo que a medição total do consumo realizado em Etanol (E100) apresentou um erro percentual máximo igual a $\pm 2,9\%$, e para a mistura de Gasolina e Etanol 27% (E27) foi igual a $\pm 3,0\%$. Assim, concluiu-se que os objetivos propostos foram alcançados de forma satisfatória e com resultados condizentes com outras técnicas propostas na literatura. Percebeu-se também que a metodologia, baseada somente nas medições dos pulsos elétricos de injeção, pode ser considerada aplicável a uma faixa ilimitada de vazão e pressão.

Palavras Chave: Medição de combustível, Consumo de combustível, Ciclo Otto, Medição do tempo de injeção.

ABSTRACT

This work encompasses the development of a methodology for monitoring and measuring fuel consumption in internal combustion engines based on the Otto cycle equipped with a Common Rail injection system, and aimed to be non-invasive, to be assembled with low-cost electronics, and to present competitive accuracy levels compared to other existing measurement techniques. In this way, the measurement process is performed without cuts in the electrical conductors, insertion of components in the vehicle's original circuits, or even direct contact with the fuel fluid, preserving the vehicle's original characteristics. The technique proposes the measurement of electrical signals sent from the vehicle's electronic central to the fuel electro-injectors. Thus, the injection times are all recorded and converted into fuel mass using a calibration coefficient provided for in the modeling equation and found through a criterion proposed in this research. The effectiveness of the proposed methodology was tested on a Single Cylinder Research Engine (SCRE), equipped with all the necessary instrumentation to evaluate the effectiveness of the system. Thirty-two tests were performed, considering four different loads on the engine shaft, four different rotation speeds, and two different types of fuel, pure Ethanol (E100) and the mixture of Gasolina and 27% Ethanol (E27). The results were evaluated in terms of percentage errors, resulting from the deviation between the values observed in the measurements of the final consumed masses recorded by the gravimetric scale (reference) and the final mass measured by the prototype. The percentage errors obtained were lower than those indicated in the literature in electromechanical type sensors, and the total consumption measurement performed in Ethanol (E100) presented a maximum percentage error equal to $\pm 2.9\%$, and for the Gasolina mixture and 27% Ethanol (E27) was equal to $\pm 3.0\%$. Thus, it was concluded that the proposed objectives were achieved satisfactorily and with results consistent with other techniques proposed in the literature. It was also noticed that the methodology, based only on the measurements of electrical injection pulses, can be considered applicable to an unlimited range of flow and pressure.

Keywords: Fuel measurement, Fuel consumption, Otto cycle, Measurement of injection time

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema do sistema proposto por (ANDRIA <i>et al.</i> , 2016)	18
Figura 2 – Registro da temperatura do combustível durante testes	38
Figura 3 – Registro da Pressão de Admissão durante testes em 1000rpm.....	39
Figura 4 – Sistema de Injeção Common Rail em motor ciclo Otto (ZHAO, 2018)	30
Figura 5 – escoamento de combustível através de Placa de Orifício (FIGLIOLA, RICHARD S., 2011)	31
Figura 6 – Esquema geral de ligação para realização dos testes	36
Figura 7 – Sala de controle do CTM (TEIXEIRA, 2017)	41
Figura 8 – Balança Gravimétrica modelo 733S da AVL LIST GmbH	44
Figura 9 – Esquema elétrico do protótipo de validação da metodologia	47
Figura 10 – (a) Disposição dos Componentes; (b) Trilhas de cobre	48
Figura 11 – PCI principal do protótipo e acessórios	48
Figura 12 – Características dos sinais de entrada; (a) Ponta de prova amperimétrica modelo 1146b Keystone (KEYSIGHT TECHNOLOGIES, 2019); (b) Sinal de corrente elétrica detectada; (c) Sinal digital tratado para os níveis de tensão TTL (0 e 5V)....	54
Figura 13 – Cenários de testes com Etanol (E100) a 1000rpm de velocidade.....	69
Figura 14 – Cenários de testes com Etanol (E100) a 2000rpm de velocidade.....	70
Figura 15 – Cenários de testes com Etanol (E100) a 3000rpm de velocidade.....	70
Figura 16 – Cenários de testes com Etanol (E100) a 4000rpm de velocidade.....	71
Figura 17 – Erro percentual dos 16 cenários de teste em Etanol (E100).....	72
Figura 18 – Erros percentuais finais dos 16 testes realizados com Etanol (E100)....	73
Figura 19 – Cenários de testes com Gasolina (E27) a 1000rpm de velocidade.....	75
Figura 20 – Cenários de testes com Gasolina (E27) a 2000rpm de velocidade.....	76
Figura 21 – Cenários de testes com Gasolina (E27) a 3000rpm de velocidade.....	76
Figura 22 – Cenários de testes com Gasolina (E27) a 4000rpm de velocidade.....	77
Figura 23 – Erro percentual dos 16 cenários de teste em Gasolina (E27).....	78
Figura 24 – Erros percentuais finais dos 16 testes realizados com Gasolina (E27)..	79
Figura 25 – Superfície de Erros Percentuais em função de rpm e pressão de admissão para testes em Etanol (E100).....	80
Figura 26 – Superfície de Erros Percentuais em função de rpm e pressão de admissão para testes em Gasolina (E27).....	81

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Especificações técnicas do SCRE e condições de operação.....	40
Tabela 2 – Características Técnicas da Instrumentação utilizada para o trabalho....	43
Tabela 3 – Erro [%] de medição da balança gravimétrica conforme a quantidade total de massa medida.	45
Tabela 4 – Dados de parte dos pulsos de injeção eletrônica medidos durante um cenário de teste de 90 segundos.	60
Tabela 5 – Definição dos parâmetros de cada cenário de teste.....	61
Tabela 6 – Coeficientes de calibração para cada cenário de teste em Etanol (E100).	68
Tabela 7 – Erro percentual total para cada cenário de teste para Etanol (E100)	72
Tabela 8 – Coeficientes de calibração para cada cenário de teste em Gasolina (E27).	74
Tabela 9 – Erro percentual total para cada cenário de teste para Gasolina (E27)	78

LISTA DE SÍMBOLOS

A_1	Área transversal dentro do corpo do eletro-injetor (m^2)
A_2	Área transversal dentro da câmara de compressão (m^2)
C_C	Coefficiente de Contração para ajustar a área à montante do orifício
$C_{calibração}$	Coefficiente de calibração ($\frac{\sqrt{m^3 \cdot g}}{s}$)
C_f	Coefficiente de fricção
P_1	Pressão sobre o combustível dentro do corpo do eletro-injetor (bar)
P_2	Pressão sobre o combustível dentro da câmara de compressão (bar)
Q_I	Vazão volumétrica de fluido incompressível ($m^3 \cdot s^{-1}$)
U_1	Velocidade do fluido combustível dentro do corpo do eletro-injetor ($m \cdot s^{-1}$)
U_2	Velocidade do fluido combustível dentro da câmara de compressão ($m \cdot s^{-1}$)
\dot{m}	Vazão mássica ($g \cdot s^{-1}$)
m_{total}	Massa de combustível total acumulada (g)
z_1	Altitude, em relação ao nível do mar, da partícula de combustível na superfície de controle dentro do corpo do eletro-injetor (m)
z_2	Altitude, em relação ao nível do mar, da partícula de combustível na superfície de controle dentro da câmara de compressão (m)
Δt_i	Tempo total de injeção medido (s)
λ	Lambda [-], indica relação entre ar e combustível na câmara de expansão.
ρ	Massa específica ($kg \cdot m^{-3}$)
g	Valor da gravidade da terra ($m \cdot s^{-2}$)

LISTA DE SIGLAS

AmpOp	Amplificadores Operacionais
BUG	Termo popularmente usado em informática para referenciar um problema
CCP	<i>Capture/Compare/PWM</i> – Circuito medidor de tempo no microcontrolador
CI	<i>Compression Ignition</i> – Ignição por compressão
CPU	<i>Central Processing Unit</i> – Unidade de Processamento Central
CTM	Centro de Tecnologia da Mobilidade
DI	<i>Direct Injection</i> – Sistema de Injeção Direta
ECU	<i>Electronic Control Unit</i> – Unidade de Controle Eletrônico
EGO	<i>Exhaust Gas Oxygen</i> – Sonda Lambda, sensor de oxigênio, sensor de O ₂ .
GPS	<i>Global Positioning System</i> – Sistema de posicionamento global.
ICSP	<i>In Circuit Serial Programming</i> – Programação serial no microcontrolador.
IMU	<i>Inertial Measurement Unit</i> – Unidade de medição inercial.
kBps	<i>Kilo Bytes</i> por Segundo – Velocidade de transmissão serial digital.
MBps	<i>Mega Bytes</i> por Segundo – Velocidade de transmissão serial digital.
OBD	<i>On-Board Diagnostic</i> – Sistema de autodiagnostico disponível na maioria dos veículos automotivos.
OBDII	<i>On-Board Diagnostic version 2</i> – sistema de autodiagnostico disponível na maioria dos veículos automotivos.
PCI	Placa de Circuito Impresso
PUT	<i>Power Up Timer</i> – Tempo de espera até o microcontrolador iniciar execução do programa
rpm	Rotações por Segundo – Velocidade de rotação de um eixo de motor
SCRE	<i>Single Cilinder Research Engine</i> – Motor de Pesquisa de Cilindro Único
SEFUM	<i>Semi Empirical Fuel Use Modeling</i> – Modelagem Semi-Empírica de Uso de Combustível
SI	<i>Spark Ignition</i> – Ignição por centelha
SMD	<i>Surface Mount Technology</i> – Tecnologia de montagem em superfície
TTL	<i>Transistor Transistor Logic</i> – Tecnologia de construção de circuitos integrados
UFMG	Universidade Federal de Minas Gerais
USB	<i>Universal Serial Bus</i> – Porta Universal de comunicação serial.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	14
1.1.	OBJETIVO GERAL.....	15
1.2.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	15
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
2.1.	INTRODUÇÃO.....	17
2.2.	METODOLOGIAS QUE SE UTILIZAM DA COMUNICAÇÃO OBDII	17
2.3.	METODOLOGIAS COM SENSORES ELETRÔNICOS INVASIVOS.....	19
2.4.	METODOLOGIAS COM SIMULAÇÕES EM SOFTWARE ESPECÍFICOS.....	22
2.5.	METODOLOGIAS BASEADAS NO ACIONAMENTO DOS ELETRO-INJETORES.....	23
2.6.	PRINCIPAIS PARÂMETROS INDEPENDENTES - ANÁLISES PRELIMINARES	25
2.6.1.	Influência da Temperatura no escoamento de combustível.....	25
2.6.2.	Influência da Pressão de Admissão no escoamento de combustível	27
2.6.3.	Influência do controle da abertura dos eletro-injetores no escoamento de combustível.....	28
2.7.	PRINCÍPIO BÁSICO DO FUNCIONAMENTO DE UM MOTOR COM SISTEMA DE INJEÇÃO TIPO <i>COMMON RAIL</i>	29
3.	FORMULAÇÃO MATEMÁTICA PARA O CÁLCULO DA MASSA TOTAL DE COMBUSTÍVEL CONSUMIDA.....	31
4.	METODOLOGIA.....	36
4.1.	DEFINIÇÃO DO ESCOPO DO TRABALHO.....	36
4.2.	EQUIPAMENTOS E FERRAMENTAS UTILIZADOS NO TRABALHO.....	40
4.3.	FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS PARA DESENVOLVIMENTO DO PROTÓTIPO ELETRÔNICO DO SISTEMA DE MEDIÇÃO DA VAZÃO DE COMBUSTÍVEL	45
4.3.1.	Esquema Eletrônico Geral e Layout da PCI.....	46
4.3.2.	Gravador e atualizador do Firmware	49
4.3.3.	Transmissão serial dos dados via cabo USB	49
4.4.	FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS DE SOFTWARE	49
4.4.1.	Linguagem de programação e compilador	50
4.4.2.	Programa de gravação do Firmware.....	50
4.4.3.	Programa para recebimento dos dados do protótipo.....	51
4.5.	FUNCIONAMENTO DO PROTÓTIPO ELETRÔNICO DE MEDIÇÃO DA VAZÃO DE COMBUSTÍVEL.....	53

4.5.1. Sensor de Corrente por Indução Não Invasivo.....	54
4.5.2. Tratamento do Sinal de Entrada	55
4.5.3. Circuito CCP do Microcontrolador	56
4.6. TAREFAS DAS ETAPAS DE CONFIGURAÇÃO E DE <i>LOOP</i> INFINITO NO <i>FIRMWARE</i>	57
4.7. TRANSFERÊNCIA DOS DADOS DO PROTÓTIPO DE MEDIÇÃO DE VAZÃO DE COMBUSTÍVEL PARA O <i>NOTEBOOK</i>	60
4.8. ESCOLHA DOS CENÁRIOS PARA TESTE.....	61
4.9. PREPARO DOS DADOS NA PLANILHA ELETRÔNICA PRINCIPAL DE ANÁLISES	62
4.10. CONVERSÃO DOS TEMPOS DE INJEÇÃO EM MASSA DE COMBUSTÍVEL	62
4.11. CRITÉRIO PARA ESCOLHA DO MELHOR COEFICIENTE DE CALIBRAÇÃO DO PROTÓTIPO DE MEDIÇÃO DE VAZÃO DE COMBUSTÍVEL.....	64
4.12. MASSAS ESPECÍFICAS DOS COMBUSTÍVEIS UTILIZADOS.....	66
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	67
5.1. RESULTADOS DAS MEDIÇÕES PARA OS TESTES EM ETANOL (E100)	68
5.1.1. Coeficiente de Calibração do Protótipo do Sistema de Medição da Vazão de Combustível, para Etanol (E100).....	68
5.1.2. Evolução dos consumos de massa de combustível Estimados e Medidos de Etanol (E100).....	69
5.1.3. Erros percentuais finais do protótipo em testes com Etanol (E100).....	71
5.2. RESULTADOS DAS MEDIÇÕES PARA OS TESTES EM GASOLINA (E27)	74
5.2.1. Coeficiente de Calibração do protótipo para Gasolina (E27).....	74
5.2.2. Evolução dos consumos de massa de combustível Estimados e Medidos de Gasolina (E27).....	75
5.2.3. Erros percentuais finais do protótipo em testes com Gasolina (E27)	77
5.3. MEDIÇÃO ÍNDIRETA DA VELOCIDADE DO MOTOR.....	80
6. CONCLUSÕES.....	82
TRABALHOS FUTUROS	83
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	84

1. INTRODUÇÃO

Ao se pensar em reduzir o consumo de combustível e aumentar a eficiência energética em um veículo, deve-se ter em mente que, além de uma melhoria contínua no comportamento do motorista, é também necessário manter um avanço constante nas tecnologias e técnicas de monitoramento do consumo de combustível. Isto é importante também para garantir o cumprimento das normas internacionais de emissão de gases nocivos (ASAD *et al.*, 2011; HERDZIK, 2016; WANG, JINGHUI; RAKHA, 2017). A medição do escoamento de combustível para a câmara de combustão também é necessária para o controle das emissões de gases nocivos (HERDZIK, 2016). É essencial ter uma instrumentação precisa para medir o consumo de combustível, pois caso contrário, não seria possível um controle eficiente de otimização do consumo de combustível. Para se implementar quaisquer ações de controle no consumo de combustível, é essencial conhecer a taxa desse consumo a qualquer instante de tempo, e com um alto grau de confiança (ASAD *et al.*, 2011). Atender a esses requisitos pode ser difícil, já que as tecnologias disponíveis no mercado atualmente, como por exemplo, alguns sensores eletromecânicos, que são instalados de forma invasiva, podem apresentar erros percentuais da ordem de até $\pm 10\%$ Furletec (2013); Sensotek (2013), dificultando a obtenção de uma informação precisa sobre o consumo instantâneo de combustível.

Apesar de toda a tecnologia incorporada nos automóveis hoje em dia, a informação sobre o consumo acumulado de combustível não é disponibilizada para a os usuários finais. Este fato em si, justifica os esforços apontados na literatura sobre o assunto, tudo isso para propor metodologias e técnicas capazes de obter essa informação de forma confiável e, de preferência, não invasiva.

Mesmo os computadores de bordo instalados de fábrica, e que já estão presentes em muitos dos atuais veículos, não são adequados para medir o consumo de combustível acumulado. Primeiramente, esta característica está fora do propósito principal desses dispositivos, e depois estes sistemas permitem ser reiniciados a qualquer momento pelo condutor, o que ocasiona na perda da referência inicial da medição e assim, torna-o inútil como um instrumento de medição à prova de fraude.

Atualmente na literatura encontram-se duas grandes classes de medidores ou processos para medição do consumo de combustível. A primeira classe corresponde às formas de Medição direta, que utilizam-se de sensores com instalações geralmente

invasivas de medição, ou seja, instalações que requerem a violação do circuito por onde passa o fluido combustível. Essa abordagem é muito criticada e vetada por parte dos fabricantes de veículo, chegando ao ponto de invalidar o termo de garantia dos veículos que fazem uso desses sensores. A segunda classe de medidores e processos de medição corresponde aos não invasivos, ou seja, aqueles que se utilizam de medições de outras grandezas físicas, senão a vazão de combustível propriamente dita, para que, através de cálculos, possam chegar ao valor da variável primária desejada. A vantagem deste último é permitir que se tenha a informação final sem comprometer a integridade ou a configuração original do sistema de injeção.

A metodologia proposta neste trabalho se enquadra na classe de medição indireta, pois permitiu a realização da medição de consumo de massa de combustível fazendo uso somente da leitura dos pulsos elétricos de injeção. Este processo indireto de medição permite que a metodologia seja instalada em qualquer faixa de pressão de *Rail* e qualquer faixa de vazão de combustível, se tornando livre de limites físicos.

1.1. Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver de uma metodologia para a medição indireta do consumo de combustível em veículos dotados de sistema de injeção eletrônica, operando no ciclo Otto.

1.2. Objetivos Específicos

Os objetivos específicos do trabalho são:

- Ser uma metodologia não invasiva. Para tornar possível a realização do objetivo geral do trabalho procurou-se também realizar a tarefa de medição de forma não invasiva, não violando os sistemas originais do veículo, tanto no circuito do fluido combustível quanto nos circuitos elétricos do mesmo;

- Ser acessível e de fácil implementação. Desde o início do planejamento da metodologia, foi buscado que a mesma fosse implementada com componentes eletrônicos de baixo custo e de fácil acesso ao mercado nacional e aos mercados menos favorecidos em tecnologia. Sendo assim, os componentes eletrônicos utilizados foram escolhidos dentre os mais populares e conhecidos na área de eletrônica;

- Ter bons níveis de precisão e exatidão. A técnica proposta também foi pensada para proporcionar níveis de precisão e exatidão finais que atendessem às mais altas exigências de processos de medição, controle e gerenciamento de combustível utilizados em frotas de veículos, empresas de transporte e áreas afins que precisam dessa informação de forma confiável, em tempo real e com dados eletronicamente disponibilizados;

- Dispensar sensores secundários. Outro importante aspecto de funcionamento para a metodologia, é que ela deve e manter seu propósito de medição com baixo nível de incerteza, sem necessitar de sensores auxiliares para monitoramento de variáveis físicas presentes no processo;

- Ser desenvolvida com ferramentas de uso livre e sem custos. Quanto ao processo de implementação e desenvolvimento da metodologia, este trabalho manteve, como premissa, o compromisso de utilizar ferramentas computacionais de uso livre e isentas de licenças com dispêndios financeiros, tanto para a parte de desenvolvimento de *hardware* quanto do *firmware* do Protótipo;

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Introdução

O presente capítulo apresenta uma visão geral sobre trabalhos de autores que, assim como nesta dissertação, despenderam esforços para desenvolver técnicas de medição da massa de combustível em sistemas de injeção eletrônica. Alguns comentários são realizados a respeito de cada ideia proposta e suas particularidades.

Quando se procura na literatura, trabalhos publicados que abordam o problema da medição do combustível, percebe-se que as soluções apontadas pelos autores passam por diversas vertentes. Com isso, acabam abordando soluções em diferentes áreas do conhecimento e utilizam-se dos mais diversos artifícios para alcançarem o resultado final, que é o conhecimento da massa final de combustível consumida por um motor, seja ele um motor de equipamento estático como gerador, ou um motor de um veículo.

As principais metodologias e tecnologias propostas na literatura para medição de consumo de combustível podem ser classificadas em: metodologias que utilizam-se de protocolos de comunicação digital com dispositivos de veículo Murta (2018); metodologias com sensores invasivos Ferrari (2017); metodologias por cálculos de parâmetros e simulação Orfila *et al.* (2016); metodologias de medição indiretas, como monitoramento de sinais elétricos (FAROOQI; SNYDER; ANWAR, 2013; HARANTOVÁ *et al.*, 2019).

2.2. Metodologias que se utilizam da comunicação OBDII

Existem vários trabalhos que propõem a utilização do sistema de comunicação padrão OBDII, como meio de se obter informações que ajudem a quantizar o consumo de combustível, como por exemplo Andria *et al.* (2016); Carvalho (2011); Espinosa *et al.* (2011); Murta (2018); Wang; Rakha, (2016) dentre outros. Geralmente todas estas propostas se baseiam em um esquema padrão como o ilustrado na Fig. 1.

Trabalhos assim geralmente propõem a construção de um protótipo que, em suma, é composto por um projeto embarcado com algum tipo de microcontrolador que trata dados recebidos da Central Eletrônica do veículo pelo *Port* OBDII e também de outros sensores e dispositivos auxiliares como por exemplo, GPS (*Global Position*

System), IMU (*Inertial Measurement Unit*). Estas informações são enviadas em seguida através de algum tipo de transmissão eletrônica, seja utilizando cabo ou wireless. Desenvolve-se assim, um sistema de alto nível, que faz análises das informações de forma mais apurada e com maior volume de dados, gerando posteriormente uma série de relatórios e sinóticos em telas de supervisão para se ter, em tempo real, uma base de informações para tomadas de decisões para o aumento de eficiência e otimização de recursos.

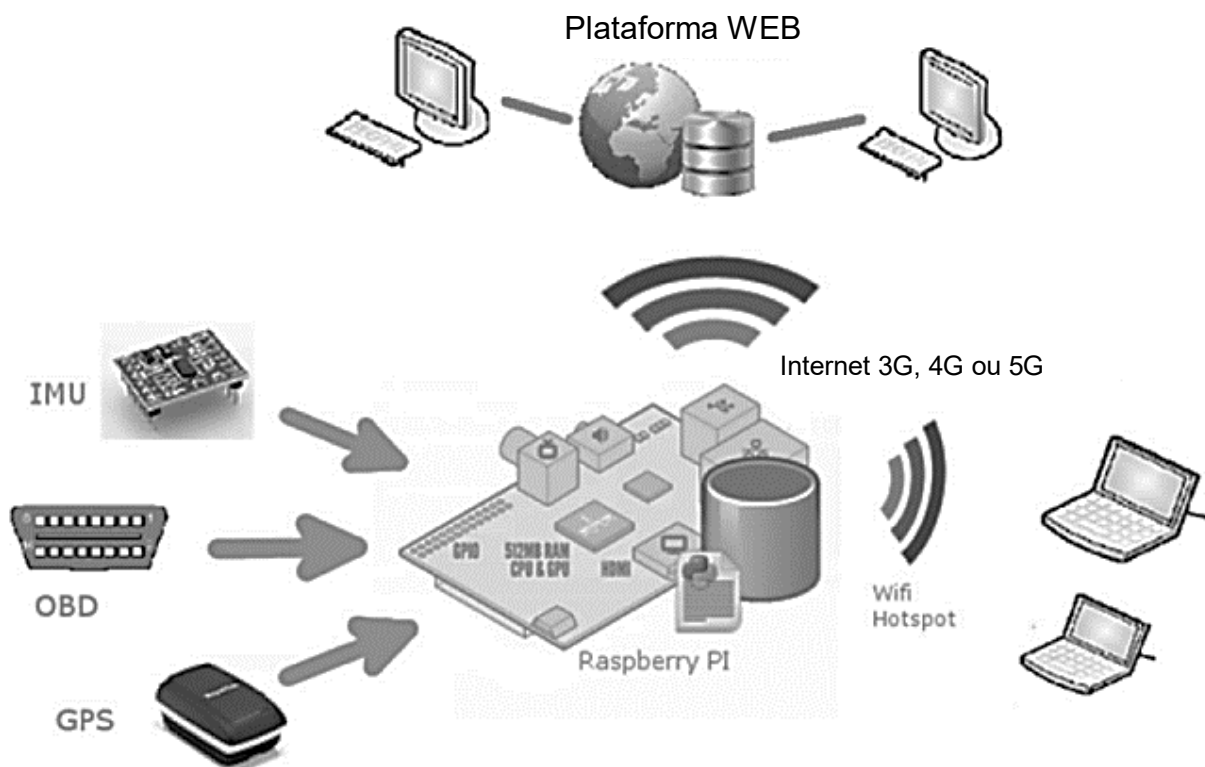


Figura 1 – Esquema do sistema proposto por (ANDRIA *et al.*, 2016)

No trabalho realizado por Espinosa *et al.* (2011) os autores salientam a importância do monitoramento do consumo de combustível para aumentar a eficiência em seu uso e para a mitigação de gases de combustão prejudiciais ao meio ambiente. Para conseguir esse monitoramento Espinosa *et al.* (2011) propõem a construção de um equipamento para monitorar algumas condições e parâmetros do veículo em situações de uso em trânsito real utilizando se, como base para seus cálculos, as informações advindas do sistema de comunicação veicular OBDII e alguns outros sensores auxiliares.

O equipamento final proposto pelos autores, conseguiu medir a variação de massa de combustível com a redundância de informações fornecidas pelo sistema

OBDII, e assim, obtiveram o consumo em gal/s (galões por segundo). Neste trabalho, os autores se preocuparam muito em ter um bom respaldo quanto às questões legislativas adotadas mundialmente, quando cita diversas normas e tratados mundiais sobre o assunto.

Informações vindas do veículo pelo canal de comunicação OBDII também foram utilizadas em Andria *et al.* (2016). O objetivo principal era desenvolver um protótipo embarcado para aquisição e análise de dados para aplicações de telemetria que serviram como base para gerenciamento de frotas de veículos e detecção de faltas. Este sistema ainda proporcionou o levantamento dos principais parâmetros de identificação do comportamento dos motoristas e assim, permitiu ao frotista mensurar a distância, o desempenho de cada condutor, fato este que contempla o consumo de combustível e manutenção da frota. Com isso, empresas puderam utilizar dessas informações para enaltecer valores de boas práticas de condução entre seus funcionários condutores, estimulando-os à melhoria constante às suas práticas de condução e de redução de consumo de combustível.

Espinosa *et al.* (2011) utilizando-se também de informações do sistema OBDII, propôs a implementação de um sistema que pudesse, ao mesmo tempo, registrar atividades e desempenho do motorista, do veículo e da estrada ou ambiente em que o mesmo trafega, permitindo avaliar o efeito direto que as condições reais do tráfego rodoviário têm sobre a emissão de poluição no meio ambiente. Entre as variáveis que puderam ser medidas simultaneamente estão: (a) da atividade do veículo: temperatura, consumo de combustível, posição global, instantânea e velocidade e aceleração médias, inclinação frontal e lateral; b) as relacionadas com características do próprio percurso: condições climáticas, inclinação e curvatura da estrada, densidade de tráfego; e (c) as derivadas de atividades do motorista: ações do pedal da embreagem, acelerador e freio. Seu protótipo pôde ser embarcado em veículos convencionais e industriais, trabalhando sob condições de áreas urbanas e interurbanas.

2.3. Metodologias com sensores eletrônicos invasivos

Quando se trata de sensores de vazão de combustível Invasivos, é comum encontrar na literatura trabalhos que se utilizam de dispositivos com princípio de

turbina, ou sensores ultrassônicos, engrenagens ovais, medidores por efeito Coriolis, medidores térmicos etc.

Mas geralmente estes sensores invasivos apresentam problemas para os quais a solução não é muito trivial. Isto se deve ao fato de estarem inseridos ao circuito por onde passa o escoamento de combustível. Desse modo, tais sensores assumem a responsabilidade de garantir a integridade do circuito, pois devem suportar praticamente todos os fatores físicos que incidem sobre o escoamento de combustível, tais como faixa de vazão, níveis de pressão interna do circuito combustível, temperatura, estanqueidade, calibração para corrigir não linearidade do sensor de vazão, forma de transmissão de seus dados, dentre outros.

Nesta área Turkowski, Dyakowska e Jakubiak (2018) apontam a necessidade de calibração dos medidores de vazão de combustível com o uso em sua própria pressão nominal de trabalho, pois a maioria dos tipos de medidores de combustível mostra uma sensibilidade aos parâmetros de cada tipo de combustível. Neste tipo de sensor, o Coeficiente de Calibração geralmente é expresso como número de pulsos por unidade de volume. Porém, esta calibração muda quando há uma alteração de pressão. A alteração da pressão operacional no escoamento de combustível, causa alteração da curva de calibração do sensor e, portanto, os medidores devem ser calibrados, com pressões mais próximas possíveis das da pressão nominal de trabalho do sistema escoamento a que se quer medir. Os autores ainda sugerem algumas práticas de instalação para superar problemas técnicos e metrológicos encontrados durante o projeto e construção desses sensores.

A preocupação sobre a calibração de sensores invasivos também é demonstrada no trabalho de Wang, Du e Xu (2019) que ressalta que a vazão de combustível é uma das principais variáveis de controle nas medições precisas do consumo de combustível, apresenta um método que utiliza de um eletro-injetor do tipo piezelétrico para produzir fluxo de excitação na tubulação para calibração dinâmica de medidores de vazão do tipo engrenagem. Em seguida, o artigo propõe uma simulação numérica para o circuito de calibração, disponibilizando-o em um banco de testes de eletro-injetores de combustível para verificar a eficácia e fornece uma referência ao desenvolvimento do sistema de calibração dinâmica para medidores de vazão de engrenagem variando a vazão de baixa intensidade até médio intensidade.

Em Marcic (1999), é feita a introdução de um eletrodo de metal o qual mede a carga elétrica depositada por gotículas de líquido que impactam um eletrodo de metal

dentro da câmara. A carga elétrica é gerada principalmente no eletro-injetor, onde o combustível se fricciona contra as partes metálicas, resultando em uma porção de elétrons livres movendo-se do metal para o combustível. O combustível então transfere essa carga elétrica para o eletrodo do sensor. A fricção serve apenas para trazer muitos pontos da superfície para se ter um bom contato. A corrente elétrica aparece também devido ao gradiente de temperatura no eletrodo do sensor. O gradiente de temperatura no eletrodo é resultado da transformação em calor da energia cinética das gotículas de combustível atingindo o eletrodo em velocidades de 100 a 300 m.s⁻¹. Assim, a carga elétrica é conduzida do eletrodo para o amplificador de carga, onde é convertido em corrente elétrica. Os resultados do teste mostraram uma operação muito confiável do sensor e uma dependência linear da área sob a curva da taxa de injeção em relação ao volume de combustível injetado. A comparação das taxas injetadas medidas com o método de carga e medição Bosch, hoje mais frequentemente utilizado, mostrou uma boa correspondência de resultados em qualquer regime operacional.

Ferrari e Paolicelli (2017) os autores propõem uma nova metodologia para avaliação, em tempo real, do consumo de combustível injetado em um motor diesel. Para tal, o procedimento adota a instalação de um transdutor de pressão instalado em um tubo posicionado entre o eletro-injetor e o *Rail*, para monitorar as ondas de pressão geradas pelas aberturas e fechamentos dos eletro-injetores. Desse modo, aplicando os dados a um algoritmo baseado nas equações de conservação de massa e balanço de momento, relaciona o resultado a um certo cenário, tomado como referência, que é parte integrante da frente da onda de pressão no escoamento do combustível, convertendo-a em vazão instantânea da massa desse combustível. Os resultados no escoamento através do tubo que conecta o injetor ao eletro-injetor são comparados com os resultados numéricos correspondentes de um modelo 1D do sistema de injeção de combustível. Verificou-se que as quantidades estimadas de combustível que entram no injetor estão bem correlacionadas com os volumes medidos do combustível injetado.

Pope e Wright (2014) os autores explicam que para vazões constantes, os medidores de vazão Coriolis medem com precisão a vazão mássica. Para estudar o desempenho dos medidores Coriolis sob escoamentos transitórios, mediram a vazão instantânea e a massa total determinada por dois medidores Coriolis. Os testes usaram um mecanismo de escoamento transitório (TFF) desenvolvido para gerar

condições transitórias de escoamento, pressão e temperatura semelhantes às que ocorrem quando um veículo movido a hidrogênio, e alcançaram boas medidas que apresentaram um valor de incerteza expandida (nível de confiança de 95%) para a massa totalizada de 0,45%.

2.4. Metodologias com simulações em software específicos

Em outros casos, Hakimelahi *et al.* (2016) utilizam-se de programas específicos como CUBE que faz uma estimativa do consumo de combustível através de cálculos baseados em um banco de dados de informações sobre viagens padrões previamente conhecidas e padronizadas. Este artigo avalia e calibra a estimativa de demanda de viagens pelo programa CUBE e sua relação com o consumo de combustível, com o uso de dados fornecidos pela Universidade Sharif, para a cidade de Shiraz, Irã, em 1999. Esta pesquisa comprova a presença de fortes correlações entre o uso de combustível em veículos e os processos de otimização de rotas por variáveis exógenas e endógenas.

Outros autores realizaram estudos com utilização Rede Neural Artificial como no trabalho de Du *et al.* (2017), que trabalhou com identificação de padrões de consumo de combustível e identificação de padrões de situações de congestionamento, usando com base, grandes amostras de dados históricos coletados em veículos em situações reais de utilização. Foram analisadas informações do motorista e os parâmetros dos veículos de diferentes classificações de grupos, a velocidade média e o consumo médio de combustível na dimensão temporal e na dimensão espacial. O modelo de previsão de consumo de combustível foi estabelecido usando uma Rede Neural de Retropropagação. Parte do conjunto de amostras foi usada para treinar o modelo de previsão e a parte restante do conjunto de amostras foi usada como entrada para o modelo de previsão.

Há ainda trabalhos que se utilizam de simulações sobre modelamentos matemáticos para o consumo de combustível em software como MatLab. Em seu artigo, Orfila *et al.* (2016) apresentam um modelo de consumo de combustível, o SEFUM - *Semi Empirical Fuel Use Modeling* ou (Modelagem Semi-Empírica de Uso de Combustível), e sua comparação com três modelos da literatura em um banco de dados experimental de 600 km. O banco de dados de teste foi construído com 21 motoristas que dirigiram em duas condições (normal e *ecodriving*) em uma viagem de

15 km. Para a avaliação do modelo, três indicadores foram selecionados: erro médio quadrático no uso instantâneo de combustível, erro acumulado e tempo de computação para avaliar a precisão no uso acumulado e instantâneo de combustível e estimar o tempo de computação de cada modelo. Os resultados provaram que o modelo era capaz de calcular rapidamente (máximo de 1.500 quilômetros simulados no Matlab) em comparação com todos os outros modelos, garantindo alta precisão e precisão para o uso cumulativo e instantâneo de combustível.

Isermann e Müller (2003) dizem que a globalização e o crescimento de novos mercados, bem como os crescentes requisitos de limites de emissões de poluentes pela exaustão de gases e consumo de combustível, forçam os fabricantes de automóveis e seus fornecedores a desenvolver novas estratégias de controle de motores em períodos mais curtos. E que isso pode ser alcançado principalmente por ferramentas de desenvolvimento e um ambiente integrado de hardware e software, permitindo rápida implementação e teste de algoritmos avançados de controle. Neste trabalho, os autores explicam a estrutura de um sistema de prototipagem rápida de controle (RCP), que permite uma avaliação rápida do sinal de medição e prototipagem rápida de algoritmos avançados de controle de motor. Um simulador de hardware no circuito para o projeto do sistema de gerenciamento e controle do motor diesel foi ilustrado e são apresentados os resultados da simulação para um caminhão de 40 toneladas. Ao fornecer modelos de motores eficientes para as ferramentas de desenvolvimento propostas, é explicada e aplicada uma abordagem dinâmica de rede neural linear local para modelar as características de emissão de gases de exaustão e consumo de combustível para um motor à combustão.

2.5. Metodologias baseadas no acionamento dos Eletro-injetores

Esta secção faz menção a alguns trabalhos nos quais a metodologia proposta se assemelha com a metodologia tratada neste documento, pois se referem a técnicas baseadas primeiramente no registro do acionamento dos eletro-injetores enviados da Central Eletrônica, que através de algum tratamento dessa informação, conseguem inferir o montante final de massa de combustível debitado pelo sistema.

A técnica encontrada nos artigos científicos que mais se assemelha ao trabalho ora proposto é o trabalho de Farooqi, Snyder e Anwar (2013), que propõem utilizar um protótipo eletrônico para capturar os dados de vazão de combustível. E no tocante à

captação do acionamento do injetor, os autores fazem uso de um circuito digital do tipo *Field Programmable Gate Array* (FPGA), juntamente com um banco de memórias digitais do tipo DMA (memória RAM) para terem alta velocidade de armazenamento e leitura dos dados no momento do tratamento dos mesmos. Contando com a alta velocidade de análise dos dados digitalmente armazenados, tais circuitos otimizam, através de tentativa e erro, o algoritmo para encontrar os melhores limiares de início e fim dos períodos inicial e final de injeção. Uma vez que os períodos de tempo de injeção foram capturados e identificados, o que ele chama de "tempo de ativação" dos injetores, a informação é analisada por outra etapa de processamento, que os registra e os acumula num sistema macro de geração de relatórios.

Harantová *et al.* (2019) reconhecem que na injeção indireta, a tarefa básica dos injetores de combustível é preparar a mistura ar e combustível mais homogênea na proporção correta. O controle eletrônico do motor regula todos os atuadores do motor e altera a quantidade de combustível injetado em relação à posição do acelerador e ao estado operacional do motor. Os sensores do veículo fornecem à Central de comando do motor os parâmetros necessários para preparar a mistura de combustível (quantidade de combustível injetado). Os parâmetros necessários para o consumo de combustível estimado de combustível foram registrados usando um dinamômetro de motor. Dentre os parâmetros registrados está a informação sobre o tempo de abertura do injetor e a quantidade de combustível a ser injetada para o equilíbrio estequiométrico. O sistema de injeção de combustível permite quantização precisa e, portanto, diminui o consumo de combustível de um motor. Harantová *et al.* (2019) mediram as durações médias dos pulsos de injeção, parametrizou os tempos de injeção em uma tabela que o convertia em massa de combustível. Dessa forma, através de um gráfico de Massa de Combustível versus Tempo de injeção, levantaram a equação da reta que os relacionava e puderam então, a qualquer momento, quantizar as massas de combustível injetadas, conhecendo assim a vazão mássica em tempo real.

2.6. Principais Parâmetros Independentes - Análises Preliminares

Antes de conceber o sistema de medição baseado na metodologia proposta, algumas considerações devem ser feitas sobre pontos que podem comprometer a viabilidade e desenvolvimento da técnica. Para tal, algumas análises e conclusões preliminares foram levantadas e algumas hipóteses de simplificação puderam ser propostas. Essas hipóteses simplificadoras foram sobre variáveis físicas de suma relevância no processo, como a Temperatura, a Pressão e a Precisão dos Eletro-injetores.

Como foi dito, a metodologia proposta neste trabalho é baseada na análise dos acionamentos do eletro-injetor, dispensando quaisquer outros tipos de aquisição de sinal, tais como do sensor para medição da pressão de admissão de combustível, sensor de temperatura do combustível, ou mesmo a forma de condução do veículo por parte do motorista. Assim, algumas considerações devem ser feitas para se ter uma base mínima de informações sobre o quanto cada hipótese de simplificação afetará o sistema proposto. Para tal, cada variável física relevante para o processo foi analisada em particular nas subsecções seguintes.

2.6.1. Influência da Temperatura no escoamento de combustível

Pode-se dizer que a variação da temperatura reflete na variação das massas específicas dos combustíveis, como é relatado em detalhes em Fox, Mcdonald e Pritchard (2014); Heywood (2018); Incropera *et al.* (2007), e este fato deve ser levado em consideração pela importância de sua influência na veracidade dos resultados (AZAM *et al.*, 2019; LI *et al.*, 2019; SAFAROV *et al.*, 2018; SALOMATOV *et al.*, 2019; YUSUF; INAMBAO, 2019).

Algumas situações evidenciam a ação da temperatura nos parâmetros de otimização em sistemas de injeção, como por exemplo, em situações com temperaturas baixas do combustível. Neste caso pesquisas presentes na literatura confirmam que a temperatura ambiente e a temperatura de funcionamento do motor, especialmente no momento da partida à frio (*Cold Start*), alteram o consumo de combustível e os efeitos indesejados como combustão incompleta Payri *et al.* (2016), podem resultar em uma queima incompleta do combustível, fazendo uma produção maior de gases nocivos na exaustão. Isto acontece tanto em sistemas de Injeção

Direta de Gasolina (*GDI System*) quanto em sistemas de Injeção Indireta (*PFI System*). Hwang *et al.* (2015) chega a afirmar que para as características de vazão de combustível a quantidade de injeção diminuiu em até 50% à medida que a temperatura do combustível aumenta de -30°C (243,15K) para 90°C (363,15K) sob o mesmo tempo de energização do eletro-injetor.

Em Chalet *et al.* (2017) os autores comprovam que durante a fase de aquecimento, o processo de combustão não é satisfatório e os dispositivos de pós-tratamento não são muito eficazes para sua correção, em decorrência das baixas temperaturas das paredes do cilindro.

Quando o motor atinge sua temperatura de operação, cerca de 90°C (363,15K), o combustível adquire uma baixa amplitude térmica. A partir de então, a variação de temperatura no combustível tende a ficar mais estável, pois todo o circuito por onde passa o combustível já se encontra pré-aquecido, incluindo o circuito do fluido no ducto coletor que leva à câmara de expansão, as mangueiras que o guiam até o *Common Rail* e os eletro-injetores. Isto faz com que a temperatura do combustível permaneça mais uniforme, melhorando os efeitos e o controle sobre a combustão.

Outro fator que contribui para a superação das adversidades térmicas que agem sobre os parâmetros físicos do combustível é que, mesmo com variações de temperatura, a quantidade de massa de combustível em cada cilindro é constantemente ajustada pelo sistema de controle do motor em resposta ao regime de trabalho exigido do motor. Cada regime de trabalho ou cenário submetido ao motor durante seu funcionamento é identificado através dos sensores que detectam as variáveis físicas relevantes ao processo de combustão, como temperatura de entrada do ar, pressão de admissão do ar, posição da válvula borboleta, sinal do sensor de oxigênio que detecta o equilíbrio e a proporção entre o ar e combustível nos gases de saída da combustão, dentre outros (HEYWOOD, 1988, seq. 7.3-Fuel-Injection Systems). Desse modo, o tempo de injeção é ajustado pelo sistema de gerenciamento do motor, utilizando o mapa de injeção pré-gravado em sua memória.

Os valores do mapa de injeção são gravados em fábrica, e são dimensionados para proporcionar a otimização da combustão, da potência exigida, e de um melhor uso do combustível quando do funcionamento do motor (GUIMARÃES, 2011). Esta contínua leitura do mapa de injeção também busca fazer com que os gases de saída apresentem um equilíbrio estequiométrico na mistura de ar/combustível, buscando, quando necessário, uma mistura estequiometricamente otimizada, e que apresente

um fator *Lambda* (λ) igual a 1. Esse controle da melhor mistura ar/combustível é principalmente realizado a partir do sinal enviado pelo sensor conhecido como Sonda Lambda, ou sensor de oxigênio, ou sensor de O₂, e por vezes também chamado de sensor EGO (do inglês *exhaust gas oxygen*). Este sensor é um dispositivo que gera um sinal elétrico proporcional à presença de oxigênio nos gases de escape, assim, possibilita que o sistema de gerenciamento do motor controle a quantidade de combustível a ser injetada na câmara de expansão do motor para uma determinada massa de ar que entra na câmara de combustão através da válvula borboleta.

Então, mesmo que a amplitude térmica sobre o combustível seja grande e altere a massa específica do mesmo, ou se houver variação abrupta na temperatura de ar da admissão, isto será detectado pela Unidade de Controle que buscará o equilíbrio estequiométrico alterando, dentre outros parâmetros, os tempos de injeção, que consequentemente alterará o montante de massa de combustível injetado. Esta variação no tempo de injeção será detectada e medida pelo circuito do protótipo previsto pela metodologia.

2.6.2. Influência da Pressão de Admissão no escoamento de combustível

O princípio de funcionamento de um sistema de injeção com *Common Rail* requer o controle da pressão em seu interior para que seu valor se mantenha o mais estável possível (ENDO; FUKUI; SASAKI, 2017; GARRETT; NEWTON; STEEDS, 2007). Porém, é sabido que mesmo existindo o regulador para a pressão interna do *Rail*, ela sofre oscilações durante o ciclo de trabalho (YUAN; ZHANG; LIN, 2019). Mesmo que estas oscilações sejam de pequena intensidade, elas são capazes de influenciar as quantidades de massa de combustível em injeções subsequentes (SZPICA, 2018a).

No trabalho de Farooqi, Snyder e Anwar (2013), que também observou a influência da pressão de entrada de combustível, os autores concluíram em seu experimento a variação de pressão no *Rail*, apesar de existir, foi insignificante e incapaz de alterar os resultados das medições de forma significativa.

2.6.3. Influência do controle da abertura dos eletro-injetores no escoamento de combustível

O sistema de injeção dotado de *Common Rail*, possui controle sobre a injeção de massa de combustível na câmara, e faz isso essencialmente através do ajuste do tempo de abertura do eletro-injetor (SZPICA, 2018a). Isto proporciona ao sistema a capacidade de injetar somente a quantidade exata de combustível necessária para que se tenha uma mistura equilibrada de ar/combustível, proporcionando ao eixo do motor a potência requerida pelo usuário. Controlando a quantidade de combustível na câmara através da manipulação do tempo de abertura dos eletro-injetores, pode-se liberar mais massa, ou menos massa de fluido combustível.

Nos estudos Ferrari e Paolicelli (2017) a respeito da resposta dos eletro-injetores e seus detalhes de funcionamento foi observado que a vazão de combustível injetada é afetada predominantemente pelo movimento da agulha do injetor que acaba produzindo flutuações de pressão dentro do *Rail*, conforme já discutido anteriormente. O efeito de abertura e fechamento da agulha do injetor ocasiona a formação de ondas de pressão. As ondas de pressão formadas acabam se deslocando para frente e para trás dentro do *Rail* e podem interferir na dinâmica de injeção de acionamentos consecutivos. Como consequência, as quantidades de massa total injetada podem ser alteradas, ocorrendo tanto em sistemas *Common Rail* em motores (SI) ignição por centelha, quanto em motores (CI) por ignição à compressão. O quanto estas ondas de pressão poderiam interferir na validação do processo também foi investigado por Farooqi, Snyder e Anwar (2013) e concluiu-se que, apesar de os eletro-injetores possuírem uma curva de descarga de combustível em função do seu tempo de energização, a maior parte do tempo em sua atuação é devida ao período em que a agulha já está totalmente aberta, e que as bordas de transição de abertura e fechamento, apesar de serem não lineares, elas representam influenciam cerca de 0,5% de variação na linearidade total, isto em caso de eletro-injetores novos, e que podem chegar até 3% em dispositivos com um tempo de utilização maiores ou perto do tempo máximo de vida (SZPICA, 2018b). Nos trabalhos de Szpica (2018a) os autores consideram que esta variação de 0,5% pode, na grande maioria das aplicações, ser tratada como desprezível sem causar prejuízo aos cálculos de massa injetada.

De acordo com Herdzik (2016) sobre os modelos de eletro-injetores atuais, o autor conclui que a quantidade de combustível injetado na câmara de combustão é majoritariamente dependente da duração de abertura do injetor. Assim, toda parcela de tempo onde acontece a não linearidade no processo de injeção causada pelos eletro-injetores foi considerada também como linear ou simplesmente desprezada.

Neste trabalho, a incerteza relativa devida à atuação dos eletro-injetores, U_{EI} , será considerada de 0,75% pelo fato de ser um eletro-injetor novo, multiplicada por uma margem de 1,5 sobre a melhor marca constatada por (SZPICA, 2018a). Esta incerteza relativa será levada em consideração no cálculo da Incerteza Combinada que engloba também as incertezas devido às variações de temperatura, pressão, e dos equipamentos envolvidos.

Considerar o eletro-injetor um dispositivo linear e constante possibilita simplificar a formulação matemática, dispensando a instalação de um sensor para o controle apurado do funcionamento do eletro-injetor.

2.7. Princípio básico do funcionamento de um motor com sistema de injeção tipo *Common Rail*

De acordo com a literatura, o sistema *Common Rail* possui características de funcionamento de forma que todos eles possuem os componentes indicados a seguir:

- Tanque de Combustível que mantêm a reserva a ser utilizada;
- Filtros de combustível, que filtram o combustível antes de ser levado ao *Rail*;
- Eletro Bomba de Baixa Pressão para coleta do combustível no tanque e enviá-lo ao circuito de alta pressão;
- Eletro Bomba de Alta Pressão para disponibilizar o combustível a uma pressão em torno de 80bar dentro do *Rail*.
- Circuito "*inlet*" de combustível, ou seja, circuito de passagem do combustível conduzido para o *Rail* (CATERPILLAR, 2013);
- O *Rail* propriamente dito, chamado também de Galeria de Combustível, é o local onde são afixados os eletro-injetores. O *Rail* armazena o combustível como último estágio antes de ser disponibilizado para os eletro-injetores. Neste componente a pressão é controlada e mantida constante;

- Os eletro-injetores são gerenciados pela central de controle do motor do veículo e são os responsáveis por injetar o combustível dentro da câmara de combustão;

Basicamente em ciclo Otto, o sistema de injeção e seus principais componentes podem ser ilustrados como mostra a Fig. 2.

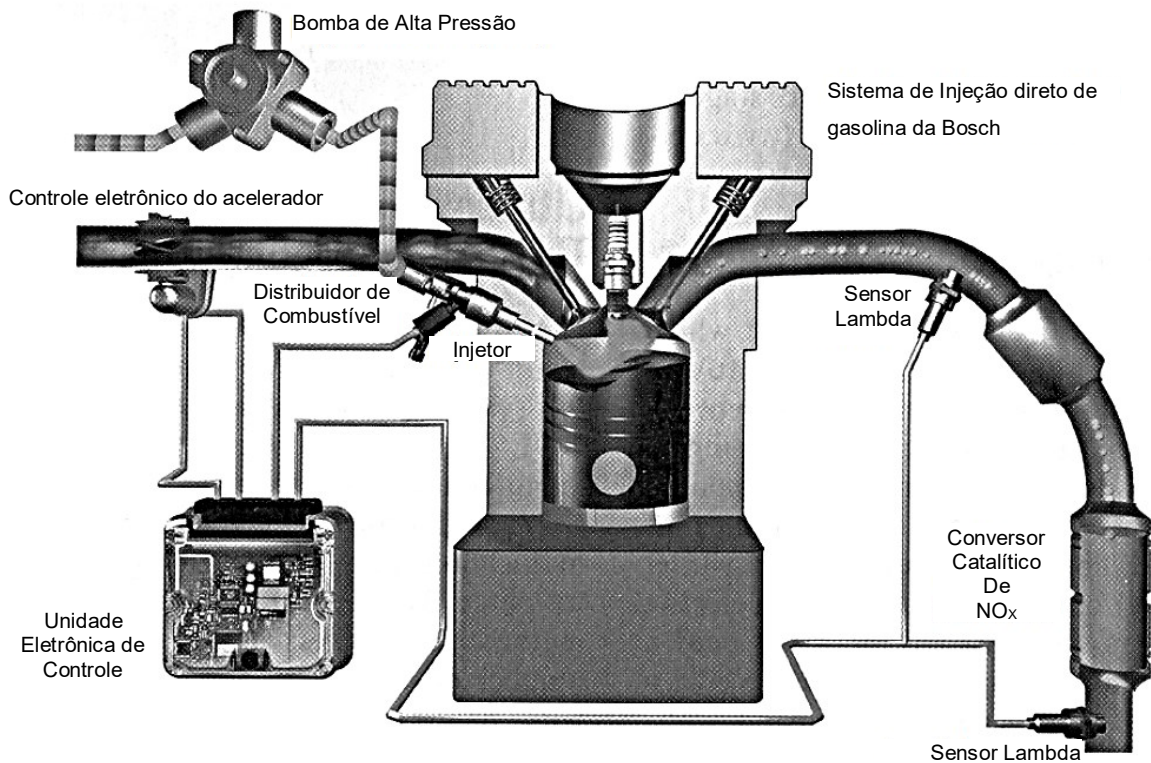


Figura 2 – Sistema de Injeção Common Rail em motor ciclo Otto (ZHAO, 2018)

O presente trabalho envolveu o desenvolvimento de um protótipo para a medição do acionamento de injeção eletrônica. Este protótipo coletou dados sobre as durações dos acionamentos do eletro-injetor e que foram posteriormente convertidos em massa de combustível consumido. Isto permitiu comprovar a eficácia da metodologia, apresentando precisão e exatidão satisfatórios e condizentes com a faixa de sensores e técnicas encontradas na literatura. Para que o protótipo de medida pudesse ser desenvolvido, algumas etapas tiveram que ser executadas em uma sequência lógica de planejamento. Quando o dispositivo pôde ser utilizado, executou-se então as atividades de testes, marcadas com a equipe de operação do CTM da UFMG. As subseções a seguir relatam todas as etapas significativas do processo.

3. FORMULAÇÃO MATEMÁTICA PARA O CÁLCULO DA MASSA TOTAL DE COMBUSTÍVEL CONSUMIDO

Para a vazão de combustível que atravessa o corpo do injetor, até chegar à sua saída para a câmara de combustão, a equação de Bernoulli pode ser aplicada com algumas ressalvas e ajustes. Essas adequações são necessárias em função das características singulares do corpo dos eletro-injetores como por exemplo, a brusca redução de área sofrida pelo escoamento, o delta de pressão dentro e fora do eletro-injetor. Considerando o sistema ideal e tomando as linhas de referência entre os pontos 1 e 2 na Fig. 3, a equação de Bernoulli, sem perda de carga, aplicada ao escoamento ideal fornecido pela Eq. 1.

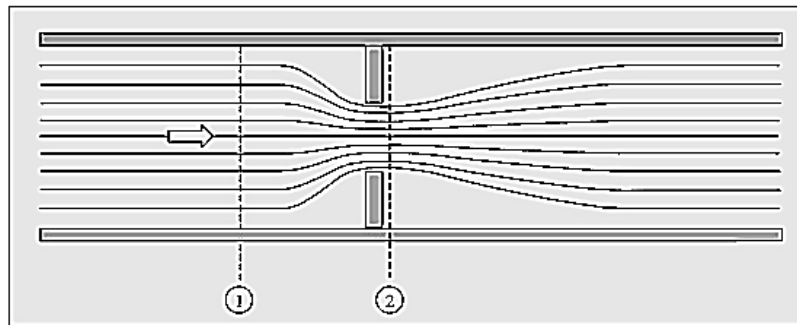


Figura 3 – Escoamento de combustível através de Placa de Orifício (FIGLIOLA, RICHARD S., 2011)

$$\frac{U_1^2}{2} + \frac{P_1}{\rho} + gz_1 = \frac{U_2^2}{2} + \frac{P_2}{\rho} + gz_2 \quad (1)$$

Onde U_1 e U_2 são respectivamente as velocidades de uma partícula de combustível na superfície de controle dentro do corpo do eletro-injetor e outra partícula de combustível na superfície de controle dentro da câmara de combustão. P_1 e P_2 são respectivamente as pressões no interior do injetor e da câmara. Z_1 e Z_2 são respectivamente as alturas, em relação a um referencial fixo, para as partículas de combustível dentro do injetor e da câmara, que neste caso podem ser consideradas iguais devido à sua proximidade.

Segundo Figliola (2011, seq. 10.5 Pressure Differential Meters), existem três tipos mais comuns de medidores de vazão utilizados nas aplicações afim. São eles: medidor por Placa de Orifício; o Venturi; e o Bocal. Entre estes tipos, pode-se ver que o injetor de combustível caracteriza uma situação mais voltada para o tipo de medidor de placa de orifício com bordas quadradas. Porém, ainda há algumas importantes observações a fazer, especialmente por se tratar de um bocal com relações de dimensões não padronizadas e com parâmetros fora dos valores tabelados para bocais padrões. Tais observações são detalhadas nos parágrafos seguintes.

Usando a Eq. 2 - Equação de conservação de massa para escoamento incompressível entre as seções 1 e 2 na Fig. 3, obtêm-se:

$$\bar{U}_1 = \bar{U}_2 \frac{A_2}{A_1} \quad (2)$$

Onde A_1 e A_2 representam respectivamente as áreas do lado de dentro do injetor e da câmara de compressão. Então, combinando a Eq. 1 com a Eq. 2 e rearranjando os termos, a vazão volumétrica incompressível pode ser obtida pela Eq. 3:

$$Q_I = \bar{U}_2 A_2 = \frac{A_2}{\sqrt{1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2}} \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho}} \quad (3)$$

Onde o subscrito I enfatiza que a Eq. 3 prevê uma vazão volumétrica para um escoamento de fluido incompressível.

Quando a área transversal ao escoamento muda abruptamente, a área do escoamento efetivo imediatamente à jusante da redução de área não é necessariamente a mesma que a área de escoamento da tubulação Figliola (2011, p. 429). Quando um fluido não pode seguir exatamente uma expansão súbita da área devido à sua própria inércia, um escoamento central chamado de *vena contracta* é delimitado por regiões de escoamento mais lento, com recirculação de vórtices, já a maior velocidade de escoamento dentro da *vena contracta* tem sua área de escoamento desconhecida, A_2 . Para explicar este valor desconhecido, é introduzido

um coeficiente de contração C_C , onde $C_C = A_2 / A_0$, com A_0 baseado no diâmetro da garganta do medidor, na Eq. 4. Isto resulta em:

$$Q_I = \frac{C_C A_2}{\sqrt{1 - (C_C A_2 / A_1)^2}} \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho}} \quad (4)$$

A Eq. 4 representa então a Vazão Volumétrica com Coeficientes de Contração, e de acordo com Figliola (2011), outros efeitos, tais como perdas de carga por fricção, podem ser incorporados em um coeficiente de atrito, C_f , de tal forma que a Eq. 4 se torna

$$Q_I = \frac{C_f C_C A_2}{\sqrt{1 - (C_C A_2 / A_1)^2}} \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho}} \quad (5)$$

Por conveniência, os coeficientes são fatorados fora da Eq. 5 e substituídos por um coeficiente único conhecido como coeficiente de descarga que representa a razão entre o escoamento real e o escoamento idealmente possível para a queda da pressão medida. Retrabalhando a Eq. 5 conduz à Eq. 6.

$$Q_I = \rho^{-0.5} \frac{C A_0}{\sqrt{1 - (A_0 / A_1)^2}} \sqrt{2\Delta P} \quad (6)$$

Onde $\Delta P = P_1 - P_2$

O comportamento do escoamento da placa de orifício foi estudado de tal forma que esses medidores são usados extensivamente sem calibração. Valores para os coeficientes de descarga, coeficientes que incidem sobre o escoamento e fatores de expansão são tabelados e estão disponíveis em manuais com padrões internacionais de escoamento, juntamente com técnicas padronizadas de construção, instalação e operação. Como cada injetor de combustível tem seu desenho específico e porque não possuem valores tabulados, a Eq. 6 deve ser ajustada por um parâmetro com um

valor a ser encontrado através do processo de calibração, conforme indicado por (FIGLIOLA, RICHARD S., 2011, seq. Standards-pág. 430).

Da Eq. 6 pode ser visto que o termo ($\rho^{-0.5}$) está relacionado ao tipo de combustível utilizado. Todos os outros parâmetros são considerados constantes e são relacionados ao sistema de injeção do modelo de veículo específico onde o protótipo será instalado, representam as grandezas físicas do sistema de injeção em questão. Por conveniência, essas grandezas serão representadas por um coeficiente único chamado Coeficiente de Calibração, $C_{calibração}$. Como a vazão volumétrica é dada em ($\frac{m^3}{s}$) e do lado direito da equação encontra-se ($\rho^{-0.5}$), pode-se ver que o Coeficiente de Calibração precisa ter sua unidade expressa em ($\frac{\sqrt{m^3.kg}}{s}$), e é dado pela Eq. 7.

$$C_{calibração} = \frac{m_{total}}{\Delta t_i \cdot \sqrt{\rho}} \quad (7)$$

Sabe-se também que a vazão mássica pode ser obtida multiplicando a vazão volumétrica pela massa específica (ρ) do combustível utilizado, como mostrado na Eq.8.

$$\dot{m} = Q \cdot \rho \quad (8)$$

Outra maneira para se medir a massa total de combustível acumulada, é dada pela Eq.9, mas para isso seria imprescindível o conhecimento prévio da vazão mássica do sistema como um todo:

$$m_{total} = \dot{m} \cdot \Delta t_i \quad (9)$$

Em que a massa total, m_{total} , do combustível consumido é obtida pela multiplicação da vazão mássica, \dot{m} , pelo tempo total de injeção em segundos, Δt_i , ou melhor, a soma de todas as durações dos pulsos elétricos de injeção enviados de a ECU do veículo aos eletro-injetores.

Assim, trabalhando com a Eq.7, Eq.8 na Eq.9, obtêm-se a Eq.10.

$$m_{total} = \Delta t_i \cdot \sqrt{\rho} \cdot C_{calibração} \quad (10)$$

Onde, como já foi dito, a constante $C_{calibração}$ deverá ser encontrada através de um processo de calibração para cada sistema de injeção diferente, em outras palavras, para cada tipo de sistema de injeção, ou cada tipo de veículo, onde se deseja implementar a metodologia em si.

Ao final de cada teste realizado com o protótipo, o valor final da massa indicada por ele foi então comparado com o valor final da massa consumida indicada pela balança gravimétrica de combustível e os erros percentuais puderam ser calculados com a Eq.11.

$$Erro = \left(\frac{m_{estimado} - m_{medido}}{m_{medido}} \right) \cdot 100\% \quad (11)$$

A Eq.11 fornece o erro percentual que representa uma informação importante quando se trabalha diretamente com controle do consumo, uma vez que este erro indica o quão significativo é o desvio entre o consumo de combustível real medido pela balança de combustível do laboratório e o consumo de combustível estimado usando a metodologia proposta.

4. METODOLOGIA

4.1. Definição do Escopo do Trabalho

A Fig. 4 ilustra o que se deseja realizar no presente trabalho para implementar a metodologia de medição do consumo de combustível, mostrando o esquema total de equipamentos utilizados, e como todos eles se interligam entre si pode ser visto na Fig. 4, o esquema elétrico geral do ambiente utilizado para realização dos testes da metodologia proposta.

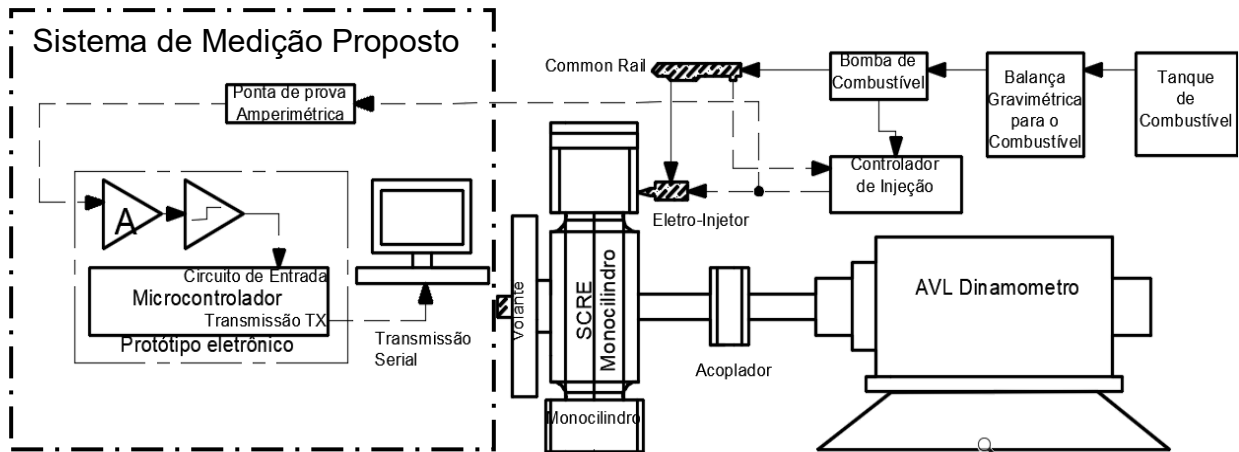


Figura 4 – Esquema geral de ligação para realização dos testes

De acordo com a Fig. 4, pode-se ver que existe no laboratório um dinamômetro de motor acoplado ao motor monocilíndrico e que este possui um sistema de injeção eletrônica com o eletro-injetor acoplado no *Common Rail* que recebe o combustível de uma bomba de alta pressão, e através dos acionamentos elétricos enviados por um Controlador de Injeção, o eletro-injetor pode abrir sua válvula e permitir a passagem do combustível que será utilizado na combustão dentro da câmara de combustão.

A metodologia propõe a medição da duração de cada acionamento elétrico recebido pelo eletro-injetor, captando o sinal elétrico de cada acionamento através de uma ponta de prova amperimétrica por indução, tratando o sinal da ponta de prova através de circuitos de entrada do protótipo eletrônico de medição, mensurando o tempo de cada acionamento e exportando estes dados para um computador. No computador os dados de tempo de acionamento serão convertidos em massa de

combustível. Assim, a metodologia permitirá, em tempo real, saber o valor da vazão de massa de combustível consumido e o acumulado de massa em um determinado período. A seguir serão dados maiores detalhes sobre o Sistema de Medição.

Para validar a eficácia da metodologia proposta, primeiramente foram levantados os recursos necessários para cumprir o planejamento do protótipo, de modo que, ao final dessa fase, fossem mais evidenciadas as etapas a serem seguidas, a ordem de execução de cada uma delas em uma ordem cronológica mais lógica e assertiva.

O presente trabalho contemplou a montagem de um protótipo eletrônico com componentes de baixo custo e fáceis de se encontrar em território nacional. Este protótipo deve possuir uma unidade central de controle implementada através do uso de um microcontrolador que, além de possuir o *firmware* de gerenciamento e coleta dos dados de injeção, pudesse transmitir estes dados para um computador onde posteriormente, fossem levantadas as informações de consumo de combustível propostas pelo trabalho. Neste protótipo também existem circuitos digitais de entrada para tratar os sinais capturados no sistema de injeção eletrônica, amplificando-os e parametrizando-os em níveis digitais TTL, tornando possível assim, a medição das durações dos mesmos com precisão suficiente para garantir precisão nos resultados dos cálculos de consumo da massa de combustível pelo motor.

Outro fato importante é a necessidade de realização dos testes em um ambiente controlado e que proporcionasse a coleta dos dados de forma confiável para servirem de referência sólida na comparação com os dados providos pelo protótipo. Sendo assim, os testes puderam ser realizados no Centro de Tecnologia da Mobilidade – CTM, um centro de excelência que abriga vários laboratórios, incluindo o Laboratório de Análise da Combustão em Motores, laboratório pertencente à rede temática de desenvolvimento veicular da UFMG em parceria com a Petrobrás. Este laboratório abriga o motor monocilíndrico de Pesquisas (SCRE), que será detalhado a seguir.

No presente trabalho, todos os testes executados durante a pesquisa foram realizados em ambiente controlado. Com isso, foi possível verificar, inclusive pelas planilhas de resultados geradas pelo laboratório do CTM, que a amplitude térmica efetiva no combustível se manteve inferior a 1°C durante um mesmo teste, porém, cada teste possuiu um valor próprio de temperatura dentro da faixa de 31°C até 42°C.

A Fig. 5 mostra o registro da temperatura do combustível em quatro testes realizados com Etanol (E100), com pressão de admissão em 400mbar. Os demais

testes, tanto em Etanol (E100) quanto em Gasolina (E27) tiveram o comportamento da temperatura do combustível semelhante a estes.

Essa amplitude térmica sobre a gasolina, que possui coeficiente de expansão volumétrica da ordem de $1,2 \times 10^{-3} \text{C}^{-1}$, acaba representando uma incerteza relativa, U_T , na ordem de 0,12% de erro nas medições para cada grau Celsius. Esta incerteza será levada em conta no cálculo da Incerteza Combinada que englobará ainda as incertezas geradas pelas variações de pressão e pela não repetitividade do eletro-injetor que serão comentadas nas secções 2.6.2 e 2.6.3 respectivamente, além das incertezas dos equipamentos envolvidos nos testes para validação da metodologia.

Como a metodologia dispensa a instalação de um sensor de temperatura do combustível dentro do *Rail*, ela usará a temperatura de trabalho do motor e um Coeficiente de Calibração constantes. Assim, o combustível foi considerado um fluido incompressível, e sua densidade volumétrica ou sua massa específica ρ (kg/m^3) foi tratada como uma constante nos cálculos matemáticos. Esta hipótese simplificadora dispensou a instalação do sensor secundário para temperatura do combustível.

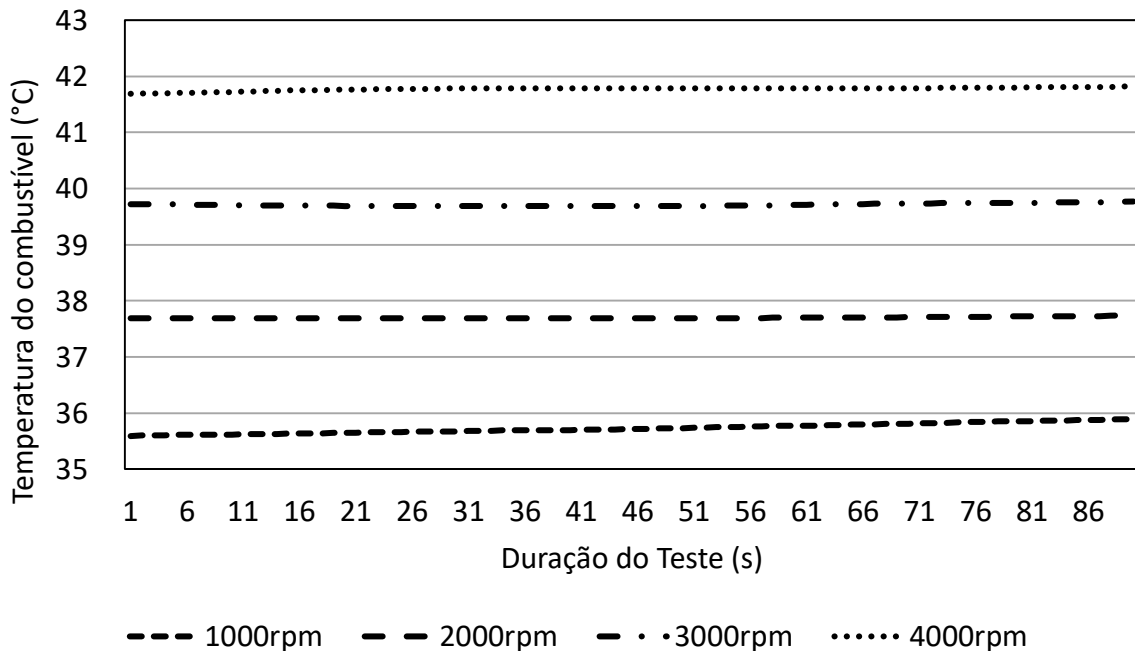


Figura 5 – Registro da temperatura do combustível durante testes.

Nos testes realizados nesta dissertação, o valor da pressão dentro do *Rail* foi mantida constante em 80bar. A pressão de admissão para a câmara de combustão compreendeu os valores de referência em 400, 600, 800 e 921mbar. Isto representou

uma variação de 0,65% no delta de pressão entre a pressão do *Rail* e a pressão dentro da câmara de combustão. Esta variação será tratada como uma incerteza relativa, U_p , nos resultados finais e será incorporada ao valor da Incerteza Combinada que incorpora também as incertezas dos parâmetros de temperatura, da não repetitividade de atuação do eletro-injetor, e dos equipamentos envolvidos.

Os registros das pressões de admissão estão ilustrados na Fig. 6.

Dessa forma neste trabalho, por motivo de simplificação matemática, uma nova hipótese simplificadora foi feita considerando a variação de pressão entre o *Rail* e o interior da câmara como uma grandeza constante. Esta consideração dispensou a instalação de um sensor auxiliar de pressão junto ao *Rail*.

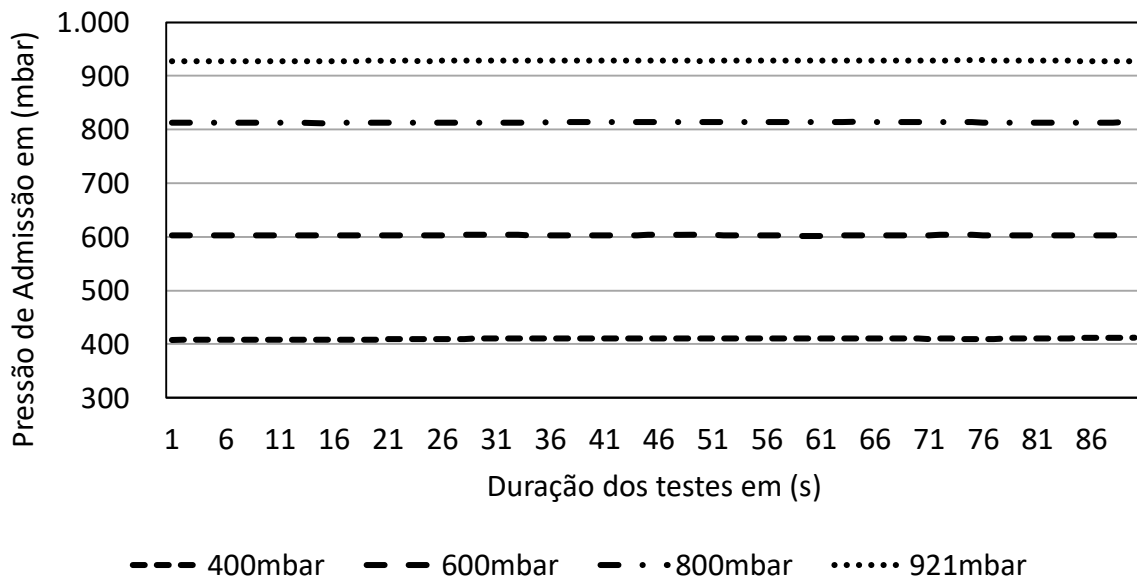


Figura 6 – Registro da Pressão de Admissão durante testes em 1000rpm

Os gráficos ilustrados nas figuras 5 e 6 foram confeccionados através dos dados retirados das planilhas oficiais de testes emitidas pelo sistema de controle do motor monocilíndrico.

4.2. Equipamentos e ferramentas utilizados no trabalho

Na Tab. 1 estão mostrados os dados e especificações técnicas sobre o motor monocilíndrico do laboratório do CTM.

Tabela 1 – Especificações técnicas do SCRE e condições de operação

Diâmetro do cilindro	82 mm
Curso do pistão	86 mm
Comprimento da biela	144mm
Volume deslocado	454 cm ³
Razão volumétrica de compressão	10,8:1 até 13,6:1
Válvulas por cilindro	4
Diâmetro da válvula de admissão	34 mm
Diâmetro da válvula de escapamento	28 mm
Sistema de injeção	Injeção direta ou Injeção indireta
Pressão de injeção	Até 120 bar (DI) ou 4 bar (PFI)
Velocidade de operação	1000 rpm a 6000 rpm
Velocidade média máxima do pistão	17,2 m/s
Máxima pressão de pico	100 bar
Pressão máxima absoluta de sobrealimentação	3 bar
Temperatura máxima da água e do óleo	110°C 120°C
Estrutura de fluxo predominante	Tumble

Pode-se dizer que o motor monocilíndrico de Pesquisas (SCRE) é parte de um sistema maior de equipamentos, cuja finalidade é permitir aquisições de dados de monitoramento e medição sobre o desempenho de motores à combustão em pleno funcionamento. O sistema completo de monitoramento é composto por quatro plataformas distintas de software e hardware, que são: PUMA; INDICOM, NAPRO e ETU.

Segundo Teixeira (2017), cada plataforma é responsável pela aquisição e monitoramento de uma parcela das grandezas medidas e controladas no motor monocilíndrico, sendo que o PUMA naturalmente faz aquisição e monitoramento dos dados do dinamômetro, tais como temperatura dos fluidos do motor, vazão de ar,

vazão de combustível, dosagem de ar e combustível na mistura formada na câmara de combustão, temperatura e pressão nas regiões de interesse, sendo possível calcular também o consumo específico e a eficiência de conversão de combustível.

O INDICOM faz aquisição e monitoramento da pressão dentro do cilindro e nos coletores de admissão e escapamento, além de receber também o sinal de injeção direta (sinal TTL de acionamento) e ignição (corrente e tensão-TTL no primário). É também através do INDICOM, que é feita a análise da combustão, além de fornece informações e visualização da curva de pressão (TEIXEIRA, 2017).

Já no sistema NAPRO, tem-se a medição em volume dos 4 (quatro) principais poluentes gasosos, a saber CO, CO₂, NO_x e HC.

Finalmente, no software da ETU se faz o gerenciamento eletrônico do motor. Neste software são ajustados o momento da ignição, da injeção de combustível, o tempo de injeção e a pressão da linha de injeção direta.

A Fig. 7 ilustra a sala de controle e os ambientes de monitoramento e controle do motor monocilíndrico durante os ensaios.

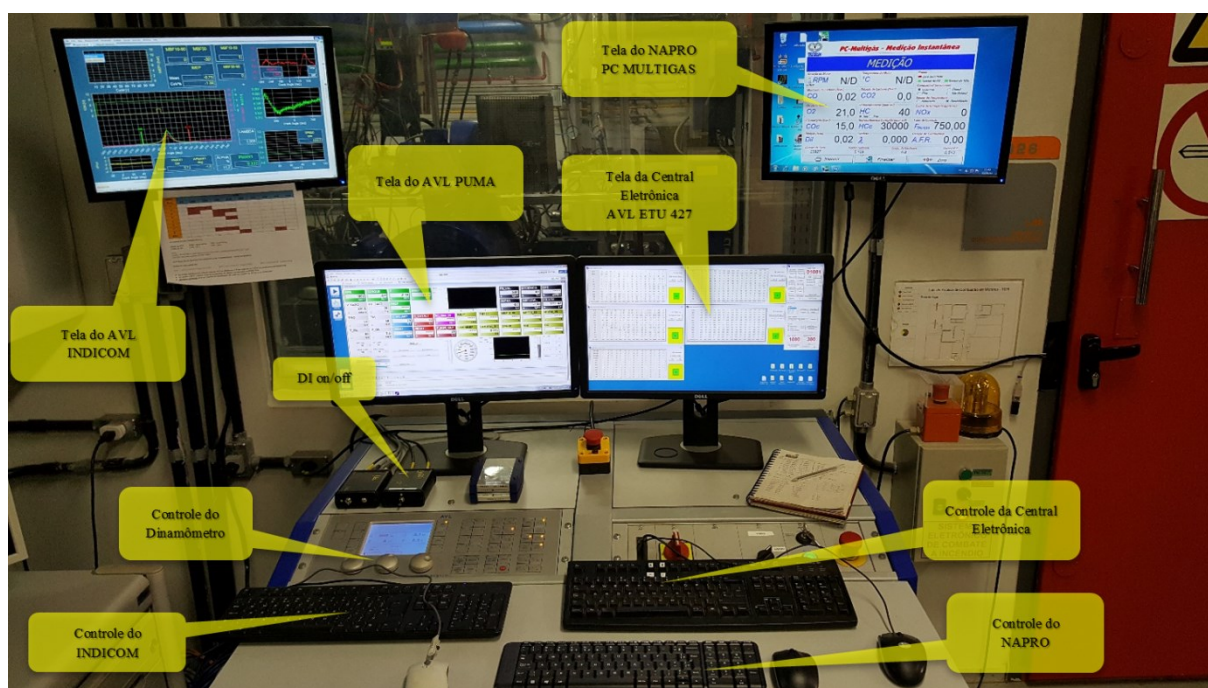


Figura 7 – Sala de controle do CTM (TEIXEIRA, 2017)

Apesar de haver comunicação entre as quatro plataformas citadas, ainda há a necessidade de tratamento dos dados em um sistema separado. Para isto, cada

conjunto de dados armazenado nas plataformas citadas é exportado para um arquivo eletrônico do tipo “.xlsx” (EXCEL), sendo que estes arquivos base são mantidos em um banco de dados permanente. Os arquivos exportados são então lidos por um script MATLAB, criado especialmente para o laboratório, e que realiza o preenchimento de dessa planilha padrão, contemplando diversas grandezas, algumas medidas e outras calculadas.

É importante chamar atenção sobre o arquivo final gerado, e dizer que ele armazena uma cópia da média de 200 ciclos do INDICOM, sendo possível observar detalhadamente a curva de pressão no cilindro, pressão na admissão e no escapamento, a taxa de liberação de calor, fração de massa queimada e a estimativa de temperatura dentro do cilindro, além dos sinais de injeção, ignição e corrente no primário da bobina para cada ponto do plano cotado utilizado como referência para os ensaios.

Dentre os dados disponibilizados nos arquivos finais de planilha foram escolhidos como principais parâmetros de referência para o presente trabalho, os seguintes dados:

- Tempo decorrido de teste, dado em segundos. Este parâmetro é chamado de *Time (s)*;
- Massa de combustível presente na balança gravimétrica, dada em gramas. Este parâmetro é chamado de *Actual fuel in the balance (g)*;
- Tempo de injeção DI, dado em milissegundos. Este parâmetro é chamado de *Injection Time (ms)*;
- Pressão Atmosférica, dada em bar. Este parâmetro é chamado de *Atmospheric Pressure (bar)*;
- Pressão do coletor de admissão, dada em bar. Este parâmetro é chamado de *Intake Manifold Pressure (bar)*;
- Rotações por segundo, dada em rps. Este parâmetro é chamado de *Rotations per seconds (rps)*.

Na Tab. 2 estão dados técnicos dos instrumentos utilizados no laboratório, instrumentos estes que forneceram as informações de estado das principais variáveis envolvidas no processo de medição.

Tabela 2 – Características Técnicas da Instrumentação utilizada para o trabalho.

Parâmetro	Fabricante / Modelo	Tipo	Faixa de Medição	Origem de Incerteza	Incerteza (Tipo B) Expandida 95%
Medidor Rotação do motor	AVL 365	Óptico	50 a 20000 rpm	Fabricante	±0,03%
Medidor Pressão na Câmara	AVL GU22CK	Piezoelétrico	0 a 350 bar	Fabricante	±0,3%
Medidor Pressão de Admissão	AVL LP11DA	Piezoelétrico	0 a 10 bar	Fabricante	±0,1%
Balança de Combustível	AVL 733S	Gravimétrico	0 a 160 kg/h	Fabricante	±0,05%
Medidor Temperatura do Combustível	PT100	Resistivo	-50 a 650 °C	Calibração	±0,7%

Os dados oriundos do Medidor de Rotação do motor foram úteis para se comprovar a estabilidade de rotacional do eixo do motor. Adicionalmente este dado serviu de comparativo e referência para captura do número exato de acionamentos do eletro-injetor durante o tempo de teste preestabelecido de 90 segundos para os testes que foram realizados. Como cada teste teve uma duração de tempo fixo e controlada eletronicamente pelo sistema, então o número de acionamentos do eletro-injetor ocorridos neste período apresentaram uma quantidade fixa por teste, que é proporcional à rotação do eixo virabrequim dividido por dois, já que o acionamento do eletro-injetor acontece a cada duas voltas completas do virabrequim.

Com a informação do Medidor de pressão do *Rail* foi possível verificar a estabilidade da pressão dentro do mesmo durante os períodos em que o combustível era injetado para dentro da câmara de combustão.

A informação vinda do medidor de pressão do ar de admissão confirma que os testes foram realizados conforme os quatro cenários distintos de posição da válvula borboleta de admissão. Esta pressão é relacionada à posição do acelerador nos veículos, e informa também a Carga na qual o eixo do motor está sendo submetido. A proposta de configuração em quatro cenários foi importante para se comprovar a viabilidade da metodologia quanto às variações de carga no eixo das rodas de um veículo durante seu funcionamento normal, simulando assim situações vistas na forma de condução de um motorista. Esta análise é importante para se comprovar que, para o funcionamento da metodologia proposta, a carga a que o veículo está sendo submetido não influencia nas medições, tornando o processo mais universal.

A Balança Gravimétrica de Combustível forneceu a informação básica para referencial de consumo de combustível para o trabalho. Uma vez que o estudo é baseado na medição de massa de combustível consumida pelo motor, o conhecimento da real massa consumida foi de suma importância para o trabalho, especialmente porque a massa consumida em cada teste foi muito pequena pois cada ensaio durava 90 segundos.

O modelo de balança utilizado no laboratório para medição de referência para a massa de combustível consumida pelo motor é o AVL 733S e é mostrado na Fig. 8.



Figura 8 – Balança Gravimétrica modelo 733S da AVL LIST GmbH

O manual de especificações técnicas da balança, informa que para probabilidade de 95%, a incerteza de medição em % é estabelecida em função da massa de combustível retirada. A informação do fabricante sobre a incerteza de medição da balança gravimétrica em função das massas medidas pode ser vista na Tab. 3 (AVL LIST GMBH, 1997).

Tabela 3 – Incerteza Percentual [%] de medição da balança gravimétrica conforme a quantidade total de massa medida.

Versão de 1800g com amplificação de:	1
Limite de sobrecarga [g]	2000
Volume medido [g]	Incerteza de medição [%]
1	16,00
2,5	6,40
5	3,20
10	1,60
25	0,65
50	0,34
75	0,24
100	0,20
250	0,14
≥500	0,12

Dentre a bateria de testes realizados no motor monocilíndrico, o teste que consumiu a maior quantidade de massa de combustível foi o cenário de 4000rpm no eixo e 921mbar de pressão de admissão. Neste teste foram consumidos um total de 148,60g de combustível. O cenário que consumiu a menor quantidade de massa foi o de 1000rpm no eixo e 400mbar de pressão de admissão, que consumiu um total de 11,65g de massa de combustível. Então, segundo dados do fabricante apresentados na Tab. 3, a incerteza que a balança gravimétrica pode inferir nestes dois resultados é respectivamente de 0,20% (que foi o melhor caso), e de 1,60% (que foi o pior caso). Mas, mesmo no pior caso, a faixa de erro da balança gravimétrica ainda pode ser considerada satisfatória para o propósito deste trabalho.

4.3. Ferramentas computacionais para desenvolvimento do Protótipo Eletrônico do Sistema de Medição da Vazão de Combustível

Para desenvolver, montar e implementar o protótipo eletrônico do sistema de medição da vazão de combustível, foi preciso fazer uso de ferramentas próprias das atividades práticas de eletrônica como ferro de solda, furadeira para placa de circuito

eletrônico, gravador para o microcontrolador, e ferramentas computacionais como software de desenvolvimento de esquema elétrico, *layout* da placa eletrônica, e ambiente de desenvolvimento e programação do *firmware* de controle para o referido protótipo. Nas seções seguintes serão apresentados detalhes e características das ferramentas que tornaram possível o sistema de medição proposto.

4.3.1. Esquema Eletrônico Geral e Layout da PCI

Todo projeto eletrônico segue um padrão de documentação próprio da área. No Esquema Elétrico são registrados todos os componentes eletrônicos que serão utilizados no dispositivo e todas as ligações elétricas que estes componentes fazem entre si. Este formato ajuda muito na identificação e compreensão de como o projeto foi concebido e quais componentes estão presentes no mesmo e que foram utilizados para a implementação dos recursos.

Depois da elaboração do esquema eletrônico de componentes, o passo que naturalmente o sucede é a confecção de um *Layout* para sua PCI, ou seja, o desenho de todas as trilhas e caminhos eletrônicos feitos para implementar a Placa de Circuito Impresso que será confeccionada para o projeto. A placa PCI servirá para fixar os componentes na disposição exata necessária para que um protótipo ou produto acabado seja concebido.

Para facilitar esta tarefa de desenvolvimento de uma PCI, existem no mercado programas específicos que auxiliam em todo o processo de projeto, desde o esquema elétrico, até a confecção do layout da PCI e, por fim, ainda podem fazer a simulação do funcionamento do mesmo. Muitos desses programas são comercializados e custam, às vezes, até alguns milhares de dólares, enquanto outros são fornecidos em versões grátis, ou seja, a princípio sem custo para sua aquisição. Existem ainda os programas que possuem suas versões pagas, mas entendem que, como forma de divulgação, devem oferecer ainda uma versão grátis com recursos limitados.

Para o desenvolvimento do protótipo, o programa escolhido para auxiliar no esquema eletrônico e na confecção da PCI foi o *EAGLE* (AUTODESK, [S.d.] Eagle). Neste caso, foi utilizada uma versão grátis do *EAGLE* que está disponível para ser baixado do site da Autodesk. Esta versão possui uma única limitação, que é a de restringir a área máxima de desenvolvimento da PCI a 80cm², mas que já é

perfeitamente aceitável ao desenvolvimento do protótipo para este trabalho, que teve a área final estimada de 50cm².

Dentro do *EAGLE* existem basicamente dois principais ambientes de trabalho, ou melhor dizendo, módulos de projeto. Um é o *Schematic*, voltado para o desenvolvimento do esquema elétrico, e o outro é o *Board*, voltado para a confecção da PCI propriamente dita.

Depois da escolha de todos os componentes eletrônicos que se quer utilizar, é possível fazer as ligações elétricas entre eles, de forma que o resultado final é um esquema eletrônico bastante limpo, de fácil interpretação, boa visibilidade, e que dispõe de recursos como, conferência e validação automática, por parte do programa, de todas as ligações elétricas do circuito. Isto evita o aparecimento de erros de ligação dos componentes no ato da confecção do layout da PCI.

Na Fig. 9 está ilustrado o Esquema Elétrico completo do protótipo projetado, evidenciando os blocos funcionais do mesmo, bem como todos os componentes eletrônicos utilizados.

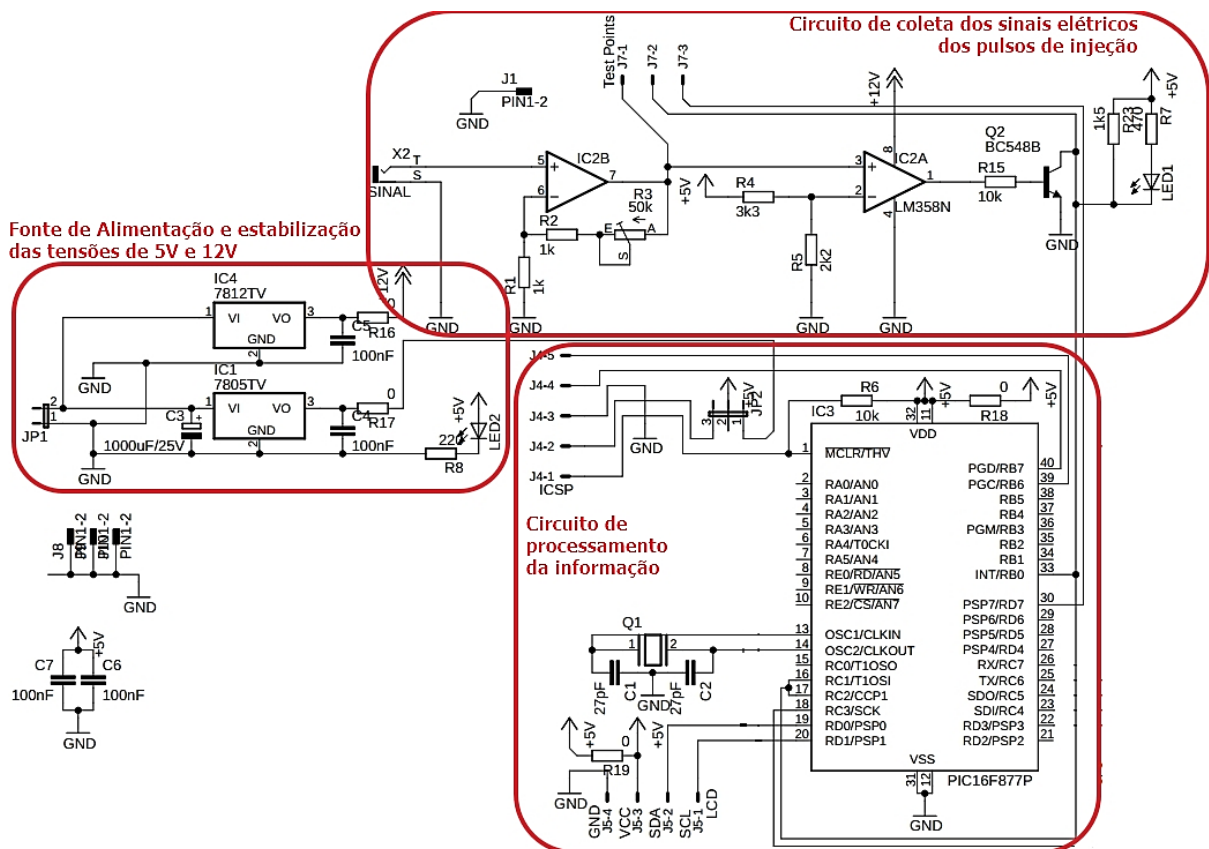


Figura 9 – Esquema elétrico do protótipo de validação da metodologia

Feito o projeto do protótipo no módulo esquemático, a etapa natural seguinte é a confecção da PCI que fixará todos os componentes ligando-os através das trilhas de cobre que serão desenhadas na placa de cobre.

A Fig. 10 (a) mostra a disposição dos componentes eletrônicos na placa de cobre, e a Fig. 10 (b) traz o desenho das trilhas de cobre que foram corroídas na placa de cobre através do processo de transferência térmica do layout para o lado de cobre da placa.

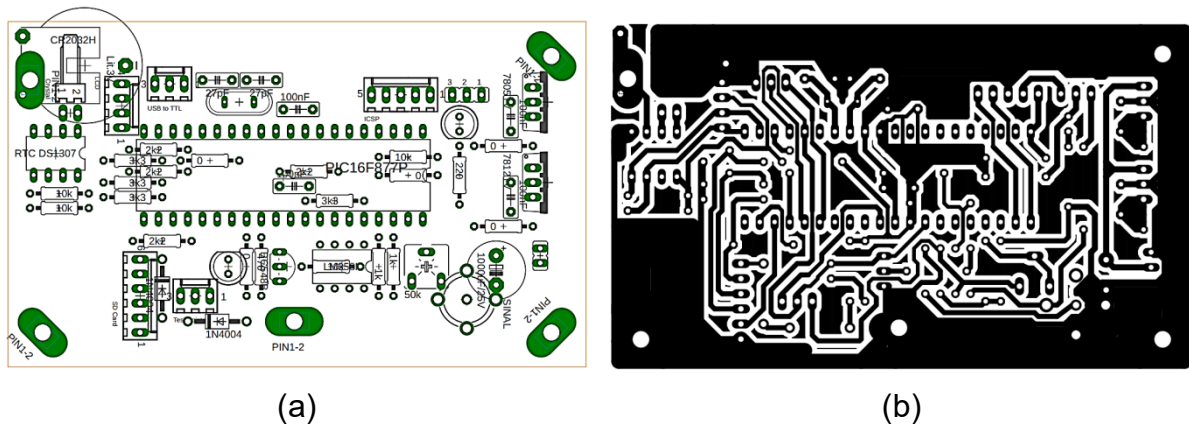


Figura 10 – (a) Disposição dos Componentes; (b) Trilhas de cobre

Verificadas as fontes de alimentação do circuito, os componentes mais sensíveis puderam ser inseridos e soldados na PCI, tais como o microcontrolador central e demais *chips* do circuito. O aspecto final da PCI já com os componentes e do protótipo completo está mostrado na Fig. 11.



Figura 11 – PCI principal do protótipo e acessórios

4.3.2. Gravador e atualizador do *Firmware*

Para a inserção do firmware no microcontrolador do protótipo de medição da vazão de combustível, foi feita uma gravação do software diretamente nos pinos do *chip* através de uma conexão do tipo ICSP (*In Circuit Serial Programming*). Trata-se de um tipo de gravação realizada com envio serial de dados para o microcontrolador de forma que, com apenas cinco pinos, é possível a comunicação com o *chip* e fazer a atualização do software nele contido, ou melhor dizendo, o *firmware* do sistema.

O dispositivo utilizado para o envio serial do *firmware* para o microcontrolador, foi o gravador da Microchip modelo PICkit™ 3 In-Circuit Debugger Microchip Technology Inc (2013), o qual possui também uma interface de comunicação entre a IDE de programação com o microcontrolador do protótipo, que é o MPLAB X IDE software on a Windows® platform.

4.3.3. Transmissão serial dos dados via cabo USB

Para que o volume de dados vindo do protótipo pudesse ser recebido em tempo real, e na velocidade que permitisse a captação dos acionamentos do eletro-injetor, gravando-os em arquivos em um notebook, foi utilizado na saída do protótipo um par de cabos que transformam sinais seriais do tipo Tx/Rx em níveis de tensão TTL, ou seja, 0V e 5V no protocolo USB (abreviatura de *Universal Serial Bus*). E para tal, optou-se por utilizar um Conversor Serial TTL/USB para receber os dados por qualquer porta tipo USB do notebook. Neste trabalho foi especificamente utilizado o Módulo Conversor USB RS232 TTL Serial modelo PL2303HX (PROLIFIC, 2012).

A taxa de transmissão escolhida para o projeto, foi de 125MBps.

4.4. Ferramentas Computacionais de Software

Nesta secção são apresentados detalhes importantes sobre as plataformas de programação, bem como os software e ambientes de desenvolvimento, como por exemplo, compilador C, simulador de circuitos, entre outros.

4.4.1. Linguagem de programação e compilador

A linguagem de programação utilizada para elaborar o firmware de controle foi a linguagem C. Isto porque a grande maioria dos compiladores de linguagem para microcontroladores da família PIC são especializados e otimizados para trabalharem com esta linguagem. A eficiência de compilação destes programas é muito alta, ou seja, na tradução da linguagem C para a linguagem de máquina dos microcontroladores estes compiladores possuem técnicas muito avançadas para manipulação das tarefas e rotinas em linguagem de máquina (PEREIRA, 2009). E para tal, optou-se em utilizar um compilador no qual pôde-se interpretar o código fonte escrito em C, e compila-lo para a linguagem de máquina específica do microcontrolador PIC18F452-I/P, o compilador CCS (CCS, [S.d.]).

Outro motivo para a escolha desse compilador foi o fato de já haver, por parte do autor deste trabalho, um vasto conhecimento prévio de seu funcionamento. Mesmo assim, todo material necessário para se trabalhar o compilador CCS está disponível para ser baixado na demonstração em (CCS, 2019).

4.4.2. Programa de gravação do Firmware

Para o gerenciamento do gravador físico do *chip* PIC18F452-I/P, o PICKit™ 3, foi utilizado o programa de gerenciamento do mesmo fabricante, e que está disponível para ser baixado em Microchip technology INC (2018), programa este que leva também o mesmo nome do gravador físico, ou seja, PICKit™ 3 em sua versão v3.10.

Este programa é necessário para que se consiga utilizar os principais recursos do hardware do gravador, todos os comandos que o gravador pode receber remotamente podem ser testados através deste *software* de controle, inclusive o recurso de *debug* remoto, o qual permite que o processamento seja pausado durante o processamento e execução do *firmware*, congelando o *chip* no momento em que se deseja ler o estado e valores de todos os seus registradores. Este recurso facilita, em muito, a depuração e validação do *firmware*.

A gravação é feita via ICSP, dispensando a necessidade de remoção do *chip* do seu soquete na placa para poder ser gravado.

4.4.3. Programa para recebimento dos dados do protótipo

As medições dos acionamentos do injetor do SCRE feitas pelo protótipo de medição de vazão do combustível duraram 90 segundos. Este é o padrão de duração dos testes realizados no laboratório CTM. Neste período de tempo, todos os acionamentos do injetor que vinham do Sistema de Controle do motor para o eletro-injetor foram registrados pelo microcontrolador do referido protótipo. Esta tarefa foi realizada com a precisão de tempo do cristal de quartzo, o mesmo cristal que sincronizava a execução de *clock* do *chip*, que é de 10MHz. Esta medição individual dos acionamentos do eletro-injetor fazia com que o volume de dados gerados pelo protótipo de medição da vazão de combustível fosse muito alto. Como não havia memória de Buffer de armazenamento no hardware do protótipo, foi necessário transferir os dados imediatamente para o computador quando da conclusão de sua medida. Este motivo contribuiu para a escolha do PIC18F452 I/P no protótipo, pois este *chip* conta com um módulo de transmissão serial muito preciso, robusto, e com capacidade de transmissão na taxa de 125kBps, que possibilitava a transmissão completa de cada medida em tempo real, de modo que nenhum dos dados gerados fossem perdidos pelo sistema.

Quanto ao que se transmitia nas mensagens individuais de cada acionamento do eletro-injetor, padronizou-se que, para cada acionamento medido, fosse enviada uma sequência de *Bytes* que era formada pela seguinte sequência de caracteres:

“T:xxxxx PN:yyyyy PW:wwwww”

Onde “T:xxxxx” representa o tempo em milissegundos em que o acionamento aconteceu desde o início do teste. Este número pode variar de 0 a 90.000 milissegundos. “PN:yyyyy” representa o número do acionamento, que é um número sequencial crescente que o próprio protótipo atribui a cada novo acionamentos do eletro-injetor medido. Este número pode variar de 0 a 15.000 acionamentos medidos. E por último os caracteres “PW:wwwww” que indicam a duração do acionamentos do eletro-injetor medida pelo circuito de CCP do microcontrolador do protótipo, dado em múltiplos de 0,8 microssegundos. Este número pode variar de 1 até 65536. Ao final da transmissão de caracteres, dois caracteres especiais indicam respectivamente uma nova linha a ser criada e o retorno do cursor para a primeira coluna.

Quando se desenvolveu o padrão da transmissão comentado acima observou-se problemas quanto à quantidade de dados que eram transmitidos do protótipo para o computador. O número de informações que chegavam ao computador estava bastante inferior ao esperado para recebimento, e isto pôde ser calculado anteriormente, pois como a velocidade rpm do motor era previamente conhecida e configurada no SCRE. Sabia-se que o número de acionamentos de injeção deveria ser a metade da rotação do motor devido aos 4-quatro tempos do ciclo Otto de funcionamento. Esta quantidade calculada para 90 segundos de duração do teste obrigava a se ter: 750 acionamentos em testes com 1000rpm; 1500 acionamentos nos testes com 2000rpm; 2250 acionamentos em testes de 3000rpm; e 3000 acionamentos nos testes a 4000rpm. Porém, a quantidade de medições transmitidas só conseguia registrar um máximo de 2812 acionamentos, nos testes a 4000rpm.

Descobriu-se que a quantidade de informações transmitidas estava sendo limitada pelo tempo de conversão dos números contidos na mensagem e que eram mostrados na base decimal, isto fazia com que cada linha a ser transmitida gastasse cerca de 32ms durante o preparo dos caracteres e envio dos mesmos. Este problema foi superado quando resolveu-se deixar os dados numéricos em seu formato hexadecimal para transmissão. Este procedimento fez o tempo de preparo e transmissão das mensagens cair para 2ms, eliminando o limite de registro para testes com rotações de até 30.000 rpm, valor bem acima de 4000 rpm programado para os cenários de teste.

No computador foi utilizado o programa PuTTY Terminal para o recebimento dos dados de medição enviados pelo protótipo, disponível para ser baixado em (TATHAM, [S.d.]).

Este programa foi desenvolvido inicialmente por Simon Tatham para a plataforma Windows, mas hoje possui o conceito de plataforma aberta e recebe suporte por um grupo de usuários colaboradores. Este programa está disponível para ser baixado, inclusive de seu código fonte.

O motivo principal da escolha do PuTTY foi a liberdade, proporcionada por ele, para a escolha da taxa de transmissão serial. Isto é especialmente interessante quando se deseja utilizar taxas de velocidades de transmissão acima do valor padrão de 115kBps e que coincidam com as taxas possíveis de se trabalhar pelo periférico serial do microcontrolador em questão. Sendo assim, todas as transmissões puderam ser muito bem-sucedidas optando-se pela taxa de transferência de 125kBps.

Os dados foram transmitidos pelo Módulo Conversor USB RS232 TTL Serial modelo PL2303HX Prolific (2012) a 125kBps e foram exportados em arquivos do tipo Texto pelo programa PuTTY Terminal, permitindo com que os dados de cada cenário fossem salvos em arquivos texto separados para facilitar o seu gerenciamento.

Depois de gerados os arquivos texto, estes eram importados dentro de uma planilha eletrônica, na qual foram realizadas todas as análises e cálculos posteriores, produzindo as informações e gráficos que ajudaram na análise dos resultados.

4.5. Funcionamento do Protótipo Eletrônico de Medição da Vazão de Combustível

Para melhor explicar como foi possível adquirir os dados de consumo de combustível de forma não invasiva, e apresentar todos os detalhes de funcionamento do referido protótipo do sistema de medição, faz-se necessário agora, que todas as etapas importantes do método de aquisição sejam explicadas separadamente. Assim, será possível perceber o sistema como um todo e ter em mente o conhecimento para necessário para entender a metodologia proposta, deixando todo processo mais claro e intuitivo. Por isso, nos subitens que se seguem, o leitor perceberá como foram resolvidas e superadas as barreiras e dificuldades encontradas durante o desenvolvimento do processo, quais foram as técnicas empregadas, e quais os equipamentos que compuseram cada etapa, desde o *Sensor de Corrente por Indução Não Invasivo*, até o *Circuito CCP do Microcontrolador*.

4.5.1. Sensor de Corrente por Indução Não Invasivo

O sinal de injeção eletrônica que vai para o eletro-injetor do motor é o sinal base para a implementação da metodologia proposta. A técnica proposta possui a premissa ser totalmente não invasiva, ou seja, ela se compromete a fazer as medições sem interferir no sistema original do veículo, tanto no que diz respeito ao contato direto com o escoamento de combustível, quanto ao contato direto também com os sinais elétricos do motor. Dessa forma, a percepção do sinal de abertura do injetor foi feita a partir da leitura do campo magnético gerado no condutor que conecta a central de injeção eletrônica do motor aos eletro-injetores.

Então, para a leitura dos acionamentos do eletro-injetor de forma induzida, foi utilizada uma ponta de prova amperimétrica do tipo “alicate”. O modelo de ponta de prova amperimétrica escolhido foi a modelo 1146b da empresa Keysight technologies (2019) pertencente ao próprio laboratório CTM.

Na Fig. 12 (a) é mostrada a ponta de prova e nas Fig. 12 (b) e (c) estão mostrados respectivamente os detalhes do sinal puro proveniente da ponta de prova, e o sinal já tratado e normalizado para os níveis de tensão digitais, ou seja, 5V e 0V, pronto para ser entregue ao microcontrolador medir sua duração.

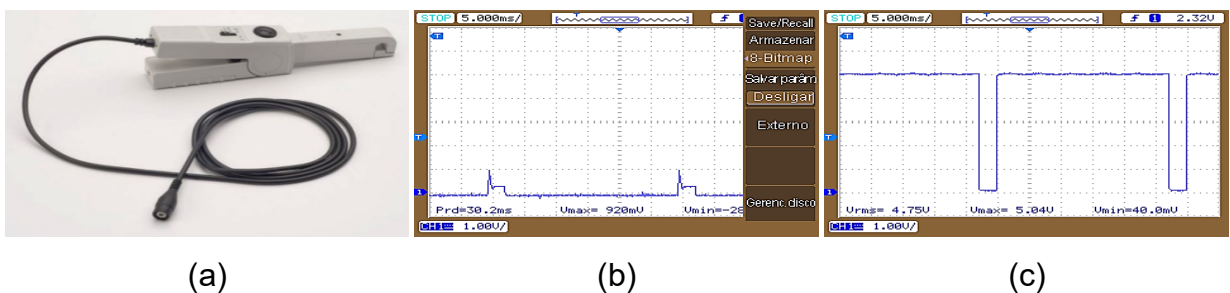


Figura 12 – Características dos sinais de entrada; (a) Ponta de prova amperimétrica modelo 1146b (KEYSIGHT TECHNOLOGIES, 2019); (b) Sinal de corrente elétrica detectada; (c) Sinal digital tratado para os níveis de tensão TTL (0 e 5V)

Para a transmissão do sinal da ponta de prova amperimétrica até a placa do protótipo, foi necessário utilizar-se de um cabo do tipo blindado, com malha de aterramento em volta do cabo de sinal. Esta malha é necessária porque a distância de aproximadamente oito metros entre a coleta do sinal até a placa do protótipo,

somada com a baixa potência do sinal induzido na mesma, seriam motivos suficientes para que interferências eletromagnéticas externas invalidassem a leitura do mesmo pelo circuito de entrada.

Como o cabo escolhido foi um cabo que possui malha de aterramento para fazer uma blindagem eletromagnética, então a integridade do sinal medido pôde ser garantida ao longo dos 8m de comprimento do mesmo.

4.5.2. Tratamento do Sinal de Entrada

Segundo informações de keysight Technologies (2019, cap. Product Markings), fabricante da ponta de prova amperimétrica, pode-se trabalhar com duas escalas de precisão com este modelo, a escala de 10mV/A ou com a escala de 100mV/A. Como o sinal de corrente do eletro-injetor é da ordem de 1,5A, o valor da tensão de pico esperado para o sinal de entrada será de 0,15 Volts (V) na escala de 100mV/A. Este valor de corrente foi calculado utilizando-se a lei de Ohm usando a tensão de alimentação do eletro-injetor que é igual a 12 Volts (V), e dividindo-a pelo valor de impedância do eletro-injetor que é igual a 8 Ohms (Ω), e multiplicando-se este resultado pela escala de 100mV/A. Então, quando o eletro-injetor receber da Central Eletrônica de controle o comando elétrico para permitir a passagem de combustível para a câmara de combustão, a ponta de prova enviará para o protótipo um sinal analógico de 0,15V. Quando o sinal cessar, este valor instantaneamente cairá a 0V devido à falta de corrente elétrica.

O fato é que um sinal de 0,15V não poderá ser entregue diretamente para leitura em um circuito digital de tecnologia TTL, pois este tipo de circuito possui uma sensibilidade seletiva de entrada muito rigorosa, a qual, considera todos os valores inferiores a 0,8V como sendo nível lógico baixo, já sinais na faixa de 0,9V até 1,9V é uma faixa de indefinição, ou seja, o circuito poderá considerá-lo tanto igual como nível lógico baixo quanto a um nível lógico alto, e sinais de entrada de 2,0V até 5V considera-o como nível lógico alto (SACCO, 2014).

A solução encontrada para fazer o reconhecimento desse sinal baixo foi a de primeiramente tratar o sinal puro vindo da ponta de prova, amplificando-o até um nível mais alto e depois convertendo-o aos níveis lógicos TTL (0 a 5V), e só então entregá-lo ao circuito digital de entrada. Estas duas etapas foram feitas utilizando-se de Amplificadores Operacionais (AmpOp), sendo o primeiro configurado como

amplificador não inversor, e o segundo configurado como comparador de tensão inversor de 0 a 5V, formando assim, os dois estágios distintos de tratamento.

Primeiramente o sinal puro da ponta de prova foi amplificado cerca de 30 vezes utilizando-se de um AmpOp na configuração de amplificador não inversor com ganho 30. Desse modo, o sinal original de 0V a 0,15V, mostrado na Fig. 12 (b), chega neste estágio e sofre uma amplificação de 30 vezes, fazendo-o variar agora de 0,04V a 5,04V.

Depois, o sinal amplificado foi entregue a um segundo AmpOp na configuração de comparador de tensão inversor, o qual compara o mesmo com um sinal de referência de 2,5V, ou seja, a metade da tensão Digital TTL, fazendo com que sua saída seja uma onda quadrada que varia digitalmente entre 0,04 e 5,04V.

Este último AmpOp além de entregar o sinal já em formato digital de 0,04 a 5,04V, ainda aciona um terceiro e um último estágio de parametrização do sinal, estágio este, composto apenas por um transistor trabalhando como chave. Este transistor faz com que o sinal se enquadre no padrão TTL (0 a 5V). Ele inverte o sinal em 180°, revertendo a ação inversora do comparador, reforça o novo sinal tratado em potência para poder alimentar o pino de entrada digital do microcontrolador com o circuito CCP. Este sinal é também para acender um LED azul para espelhar o sinal recebido de forma visual. Este último estágio tem uma importância bastante significativa para o protótipo e permite que o usuário saiba que os sinais estão realmente chegando ao circuito de medição através do piscar do LED.

4.5.3. Circuito CCP do Microcontrolador

Foi escolhido um microcontrolador de 8 bits, com *clock* de 10MHz, provido de circuito CCP (*Capture/Compare/PWM*) bastante conhecido entre os profissionais da área de controle e automação. O microcontrolador escolhido foi o PIC18F452-I/P, fabricado pela Microchip Technology (TECNOLOGY INC., [S.d.]).

Como a metodologia precisa basear-se na medição da duração dos sinais de injeção de combustível com a melhor precisão possível, foi feito uso de um periférico interno ao microcontrolador mais conhecido por circuito de CCP, que é a abreviação de *Capture/Compare/PWM*. Estes três nomes dizem respeito aos três modos de operação que este circuito pode ser configurado. Tal periférico foi de grande valia para o processo, pois ao ser configurado para a função de *Capture*, ele consegue fazer a

medição de um sinal digital com precisão de microssegundos, pois é um circuito de *hardware* dotado de *Timer* interno com precisão de 16 bits. Este circuito faz a medição da duração de um sinal digital, desde sua borda inicial até sua borda final, usando um circuito contador de 16 bits, que representam ao todo 65536 contagens de base de tempo de 0,8us cada uma, o que permite registrar acionamentos em uma faixa de medição de 0,8us a 52,4288ms. Esta faixa de tempo é suficientemente para a medição dos acionamentos de injeção, que normalmente variam de 1ms até um máximo de 50ms, quando o veículo se encontra em situações reais de tráfego.

Como a resolução do contador foi programada para 3,2us, isto significou que sua resolução temporal foi 312,5 vezes mais rápida que o acionamento de injeção de 1ms. Então, para medir um acionamento de 1ms de duração, o erro percentual máximo esperado foi de até 0,32%. Este valor valida o circuito CCP para atuar com a metodologia proposta, pois seu erro percentual, no pior caso, foi equivalente aos demais dispositivos envolvidos no processo.

O Circuito de CCP do microcontrolador além de fazer, de forma autônoma, a captura do tempo de duração de cada acionamento de injeção ainda tem a capacidade de gerar uma interrupção no processamento do microcontrolador nos momentos em que ele já dispõe dos valores medidos prontos para serem armazenados. Esta característica é muito importante no processo, pois permite ao microcontrolador executar outras funções enquanto a tarefa de medição é executada em paralelo pelo CCP, e permite ser interrompido somente quando o valor da medição já se encontrar pronto e disponibilizado para armazenamento, aliviando, em muito, o trabalho da CPU do microcontrolador.

Outro fator primário que propiciou a precisão e exatidão nas medidas de tempo de duração dos acionamentos do eletro-injetor, foi o fato de ter o *clock* principal do microcontrolador provido por um circuito de Cristal de quartzo com precisão de 25ppm. A cada 1×10^6 partes de tempo, o fabricante do cristal garantia uma faixa de erro de apenas 25 partes, o que representa um erro percentual de apenas 0,0025% (GONÇALVES *et al.*, [S.d.]).

4.6. Tarefas das etapas de configuração e de *Loop* Infinito no *Firmware*

Feitas as observações sobre o tratamento do sinal vindo da ponta de prova, conversão dos níveis de tensão para o padrão digital TTL e a entrega do sinal já

tratado para o circuito de entrada do CCP do microcontrolador, o mais importante agora é comentar sobre as tarefas que o software residente no *chip*, ou melhor, tarefas que o firmware executa nas fases inicial de configuração do sistema e na fase permanente de medição, chamada de loop infinito.

Primeiramente quando o protótipo é energizado, um circuito interno chamado de PUT ou *Power Up Time*, faz com que o microcontrolador aguarde um tempo de 72ms até que a alimentação do sistema se estabilize para, só então, iniciar a execução do firmware, isto evita que o microcontrolador comece a executar importantes instruções de configuração sob uma tensão de alimentação instável, evitando problemas e *bug's* no sistema.

Iniciada a execução do *firmware*, ele começa a configurar os periféricos internos ao microcontrolador, tais como os *Timers*, os registradores de interrupção, os níveis iniciais de todos os pinos de entrada e saída, configuração do circuito CCP, inicialização do *display* LCD externo onde o protótipo mostra os resultados finais de cada teste, inicialização do periférico de comunicação serial para o *notebook*, dentre outros. Esta fase é chamada fase inicial de configuração, e é executada somente uma vez, exatamente na inicialização do sistema.

Executadas todas as etapas contidas na fase de inicialização e configuração, o *firmware* entra na fase que realmente desempenha as funções básicas para as quais foi desenvolvido. Esta fase será executada ininterruptamente até o desligar do sistema, ou seja, a fase que contempla tarefas como a de medição dos sinais do injetor, transmissão de todas as informações geradas pela medição dos acionamentos do eletro-injetor para a comunicação serial para o *notebook* via USB, o registro e armazenamento do acumulado das medições, para que, ao final de todos os testes, o microcontrolador possa apresentar os totais de massa de combustível medidos, e a quantidade de sinais medidos em cada teste.

Expondo mais detalhadamente as tarefas que o microcontrolador deve executar no *loop* infinito, pode-se dizer que, nesta fase, ele:

- Atualiza constantemente as variáveis de registro de tempo no sistema, isto para que os testes, que são de 90 segundos de duração, possam ser sincronizados com o tempo de aquisição no protótipo;
- Atende a quaisquer chamadas de interrupção gerada pelo sistema, como por exemplo, as geradas quando da chegada de cada acionamentos do

eletro-injetor iniciado, incrementando o número sequencial do mesmo e registrando o tempo inicial do sinal.

- Atende às chamadas de interrupção quando do término de cada acionamento do eletro-injetor que termina, registrando o tempo final do acionamento, calculando sua duração, transmitindo os dados do mesmo para o *notebook* e acumulando sua duração na variável de tempo total de injeção para depois calcular a massa total de combustível consumida.
- Faz leitura dos comandos recebidos via serial, para alguma requisição do usuário, tais como abortar teste, reiniciar registros etc.

Pela explicação acima pode-se perceber que o loop infinito só entra nas atividades de medição dos pulsos recebidos pelo CCP quando acontece o início ou o término de cada acionamento do eletro-injetor capturado. Isto ocorre porque há uma chamada de interrupção gerada pelo próprio circuito CCP, que faz com que o microcontrolador pare imediatamente o que está fazendo nas rotinas do *loop*, salve os parâmetros principais e salte a execução para a rotina de medição do acionamento. A princípio pode parecer que as tarefas executadas após uma chamada de interrupção farão com que o microcontrolador perca a informação exata de tempo sobre o acionamento do eletro-injetor, porém, acontece exatamente o contrário, pois esta é exatamente a função do circuito CCP, a de registrar, via *hardware*, as informações de tempo de cada acionamento do eletro-injetor sem que haja a intervenção do processador central do microcontrolador. Assim, mesmo que o microcontrolador execute algumas tarefas de backup de variáveis antes de atender à rotina de interrupção para medir o acionamento do eletro-injetor, ele não precisará se “preocupar” com a exatidão e precisão da medida de duração dos acionamentos, pois estas informações são gravadas no momento exato da ocorrência de um evento de início ou de final de cada pulso. Quando o microcontrolador entra na rotina de interrupção para capturar as informações de tempo, estas já foram então medidas com precisão pelo circuito CCP e já ficam disponíveis para o Microcontrolador somente ler os valores, e armazena-los depois. Este é o motivo das medições dos pulsos pelo circuito CCP serem precisas e muito confiáveis, e é esta precisão que garante um bom suporte à metodologia apresentada.

4.7. Transferência dos dados do Protótipo de Medição de Vazão de Combustível para o *notebook*

Todos os acionamentos do eletro-injetor de injeção foram, um a um, exportados, via cabo serial USB, para o *notebook* ou computador, e armazená-los em arquivos tipo texto. Cada linha de texto gerada pelo protótipo contém os dados de um acionamento específico do eletro-injetor, e continha também o número sequencial e único para este acionamento, sua duração em milissegundos, o instante em que este acionamento ocorreu dentro do período de 90s de teste, também em milissegundos. Subsequentemente, os dados de todos os acionamentos de injeção foram importados, linha após linha, pelo software PuTTY Terminal que além de receber o texto, ainda juntava todas as linhas em um arquivo texto referente a aquele teste específico as gravava em um arquivo de dados. Para mostrar parte de um desses arquivos texto, tal qual eram gerados e salvos no HD, as linhas iniciais e finais do mesmo foram ilustradas na Tab. 4.

Tabela 4 – Dados de parte dos pulsos de injeção eletrônica medidos durante um cenário de teste de 90 segundos.

Tempo (s)	Número do acionamento	Duração acionamento (ms)
0,016	1	1,72480
0,056	2	1,72480
0,096	3	1,72480
0,136	4	1,72480
0,176	5	1,73120
.	.	.
.	.	.
.	.	.
89,816	2246	1,71840
89,856	2247	1,72160
89,896	2248	1,72160
89,936	2249	1,72160
89,976	2250	1,71840
Acumulado de tempo dos acionamentos (ms):		3826,4672

O arquivo texto de cada cenário de teste depois de gravado era importado em uma planilha eletrônica geral na qual concentrava todas as fórmulas de análises

baseadas nestes dados. Tal planilha também serviu de base para geração de todos os gráficos informativos mostrados na secção 5 deste trabalho.

A geração de todos os arquivos texto acontecia assim que cada cenário de teste era executado no SCRE, desse modo, cada um dos 32 cenários de teste, sendo eles 16 cenários para Etanol (E100) e 16 cenários para Gasolina e Etanol (E27), possuía seu próprio arquivo texto importado do protótipo e arquivado no HD do *notebook*.

4.8. Escolha dos cenários para teste

Para se comprovar a eficácia da metodologia proposta e que a incerteza nas medições, à princípio, não depende do regime de trabalho dos veículos, ou mesmo da forma de condução do motorista, foi necessário pensar em cenários de operação para o motor que refletissem situações de trabalho numa longa faixa e rotações e cargas no eixo. Desse modo, realizando testes que pudessem mostrar desde cenários com baixa rotação como 1000 rpm, até uma alta rotação como 4000 rpm, e que além disso, pudessem se submeter a cargas leves no eixo do motor com pressões de admissão na ordem de 400mbar até cargas pesadas com aceleração máxima do motor, onde a pressão do ar de admissão se iguala à pressão atmosférica local de 921mbar.

Desse modo, optou-se pelos valores de teste mostrados na Tab. 5.

Tabela 5 – Definição dos parâmetros de cada cenário de teste

Velocidades	Pressão do ar de admissão (carga sobre eixo do motor)			
	400 mbar	600 mbar	800 mbar	921 mbar
1000 rpm	Cenário 1	Cenário 5	Cenário 9	Cenário 13
2000 rpm	Cenário 2	Cenário 6	Cenário 10	Cenário 14
3000 rpm	Cenário 3	Cenário 7	Cenário 11	Cenário 15
4000 rpm	Cenário 4	Cenário 8	Cenário 12	Cenário 16

Com estes valores conseguiu-se realizar a combinação da velocidade do motor e a pressão do ar de admissão e pôde-se alcançar 16 cenários de testes que refletiram

a grande maioria das situações normais de dirigibilidade em um veículo, comprovando assim a eficácia da metodologia nestas situações.

É importante ressaltar também que tais cenários de teste foram reproduzidos em dois tipos distintos de combustíveis, sendo eles o: Etanol hidratado (E100) e a mistura de Gasolina e Etanol a 27% (E27). Assim, foram realizados ao todo 32 testes, todos eles com durações iguais a 90 segundos cada, tudo para que os mesmos contribuíssem ao máximo na padronização e comprovação das observações de consumo do motor, e também para que as análises pudessem ser mais facilmente comprovadas e conclusivas.

4.9. Preparo dos dados na planilha eletrônica principal de análises

Ao final dos testes, seguindo a sequência pré-definida dos cenários mostrada na Tab.5, pôde-se então importar os resultados oficiais enviados pelo laboratório do CTM na planilha eletrônica juntamente com os dados enviados pelo protótipo.

Depois da montagem da planilha eletrônica geral, a primeira informação importante que pôde ser verificada foi a progressão cumulativa dos débitos de massa de combustível queimados pelo motor ao longo dos 90 segundos de duração dos testes, dados estes que foram indicados pela balança gravimétrica.

Em segundo lugar pôde-se tratar os dados de tempo importados do protótipo, convertendo-os em massa de combustível. Para tal, foi utilizado o modo de conversão detalhado na seção 4.10.

Depois de convertidos os tempos de injeção em massa de combustível, esta informação pôde ser comparada com a informação vinda da balança gravimétrica, pulso a pulso, ao longo dos 90 segundos de duração de cada teste.

4.10. Conversão dos tempos de injeção em massa de combustível

O cálculo da massa de combustível, em miligramas, debitada em cada duração de acionamentos do eletro-injetor medido pode ser calculado com base na Eq. 10 apresentado na seção 3, ou isolando a constante de calibração conforme Eq. 7:

$$C_{calibração} = \frac{m_{total}}{\Delta t_i \cdot \sqrt{\rho}} \quad (7)$$

Onde:

- m_{total} representa a massa de combustível indicada pela balança gravimétrica segundo a segundo para plotar os gráficos, ou pode ser acumulado total de massa de combustível no final de cada teste;
- Δt_i representa tempo de injeção de cada acionamento medido pelo protótipo de medição da vazão de combustível para plotar os gráficos, ou pode ser o acumulado total de tempo de injeção de cada teste;
- ρ é a massa específica do combustível utilizado. Este valor foi adotado segundo o critério descrito na secção 4.12;

Dessa forma pela Eq. 7 calculou-se todos os Coeficientes de Calibração para cada cenário de teste em específico.

Desse modo, para que a Eq. 10 seja implementada de forma mais assertiva, cada Coeficiente de Calibração em particular, inclusive a média aritmética dos mesmos, foram utilizados, um-a-um, para recalcular todas as massas de combustível, e o valor de Coeficiente de Calibração que proporcionou o menor erro percentual em todo o histórico de testes, foi então escolhido para aferir o protótipo, para gerar os gráficos de evolução dos testes e foi, a partir desse ponto, chamado de Melhor valor de Coeficiente de Calibração. Assim, ao se construir um dispositivo medidor baseado nesta metodologia, o Melhor Valor de Coeficientes de Calibração deverá ser armazenado na memória do mesmo, permitindo assim, que o dispositivo medidor calcule corretamente as massas de combustível.

Interessante comentar que, ao se criar um medidor comercial, este deverá conter uma biblioteca interna com os Melhores Valores de Coeficientes de Calibração das marcas e modelos de veículos que o usuário desejar aplicar a metodologia, dispensando a necessidade de fazer nova aferição no equipamento.

Outra vantagem que se tem quando se utiliza a Eq. 10 é a possibilidade de escolher o tipo de combustível com o qual se realizarão as medições, pois ao cadastrar os valores dos parâmetros das densidades específicas, ρ , de cada combustível, na temperatura média de trabalho do motor, o dispositivo fará o ajuste do mesmo na Eq. 10, aumentando precisão nas medidas.

É importante enfatizar que este raciocínio de calibração resume o processo de verificação previsto quando se tem um sistema de fluxo tipo bocal de orifício onde seus valores dimensionais e os coeficientes de fluxo efetivo não são conhecidos, ou

que estejam fora dos padrões dimensionais previamente tabelados (FIGLIOLA, RICHARD S., 2011).

4.11. Critério para escolha do melhor Coeficiente de Calibração do Protótipo de Medição de Vazão de Combustível

No final de cada procedimento de ajuste da sensibilidade do protótipo, duas importantes informações podem ser conhecidas que são o total de massa de combustível que é indicado por um equipamento tomado como referência, que neste trabalho foi a balança gravimétrica, e o tempo total de injeção de combustível medido pelo protótipo. Ao aplicar estas informações na Eq. 7 juntamente com o valor da massa específica do combustível utilizado neste procedimento em específico, tem-se então o coeficiente de calibração específico deste teste, ou deste cenário. Isso não quer dizer que este valor representa o melhor coeficiente de calibração para protótipo neste sistema, mas ele é mais uma informação que contribuirá para encontrar o melhor valor para a sensibilidade do protótipo.

Como mencionado na secção 4.10 as conversões dos tempos de injeção para massa de combustível foram implementadas neste trabalho de forma off-line com o apoio de uma planilha eletrônica no computador. A forma de se implementar o critério de escolha do melhor Coeficiente de Calibração se resume no seguinte procedimento:

- Ao se finalizar um procedimento de ajuste de sensibilidade do protótipo e se obter os parâmetros necessários para a Eq. 7, calcula-se então o Coeficiente de Calibração deste teste em específico. Este valor vai para o histórico de aferições. Assim o histórico de aferições guardará os parâmetros de todos os testes realizados com o protótipo, com este determinado combustível;
- O próximo passo é recalcular os erros percentuais de cada procedimento de ajuste de sensibilidade do protótipo já armazenado neste histórico, ou seja, erros que são representados na Eq. 13 por E_1, E_2, \dots, E_n , com base no novo valor de vazão mássica desse último procedimento de calibração;
- Recalculados todos os erros percentuais E_1, E_2, \dots, E_n em todo histórico de aferições, faz-se através da Eq. 13, o cálculo do valor eficaz dos erros percentuais. O resultado será representado por E_{rms} ;

- Caso este novo E_{rms} calculado apresente um valor menor, em módulo, que o valor E_{rms} que está atualmente servindo de referência no protótipo, então este novo último Coeficiente de Calibração assumirá o lugar do atual, e passará a ser utilizado pelo protótipo nos futuros procedimentos de ajuste de sensibilidade do protótipo. Caso contrário, ou seja, caso o novo E_{rms} recalculado não apresente um valor menor de erro percentual global para todo histórico, então simplesmente o Coeficiente de Calibração que já está no protótipo, continuará sendo a referência de trabalho, e nada é inalterado.

$$E_{rms} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n E_i^2} = \sqrt{\frac{E_1^2 + E_2^2 + \dots + E_n^2}{n}} \quad (13)$$

Evidentemente no início da formação do histórico de calibrações, quando se está armazenando o resultado do primeiro procedimento de ajuste de sensibilidade do protótipo, o histórico conterà somente o primeiro registro e conseqüentemente somente um valor de erro percentual (E_1) poderá ser calculado pela Eq. 11, neste caso ao colocá-lo na Eq. 13, o valor de E_{rms} será igual a E_1 , e o seu respectivo Coeficiente de Calibração será o próprio calculado para este único procedimento realizado, até que, no decorrer de novos procedimentos de ajuste de sensibilidade do protótipo, um novo e melhor Coeficiente de Calibração assuma seu lugar como referência para os cálculos no protótipo.

Este critério deverá ser repetido toda vez que um novo procedimento de ajuste de sensibilidade do protótipo for realizado, garantindo que o protótipo esteja utilizando sempre o melhor Coeficiente de Calibração encontrado para conversão dos tempos de injeção para massa de combustível. O Melhor Coeficiente de Calibração é o que proporcionou o menor erro eficaz no histórico de calibrações realizadas, e seu significado físico representa o valor que, segundo dados disponíveis no histórico de testes, é o que melhor incorpora os fatores físicos como coeficiente de descarga, coeficiente de fluxo, variação de pressão, temperatura, propriedades do fluido combustível, erros dos equipamentos envolvidos e, inclusive, o tipo de combustível usado. O Melhor Coeficiente de Calibração deve ser salvo na memória do protótipo,

possibilitando-o fazer as conversões dos tempos de injeção em massa de combustível nos futuros procedimentos de medição.

É importante ressaltar que cada tipo de combustível e cada tipo de veículo gerará um Coeficiente de Calibração específico, pois, como este valor representa efetivamente todas as características físicas do sistema de injeção para um determinado combustível, então, poderá existir futuramente uma tabela que contenha todos os melhores valores de calibração encontrados para os modelos e marcas de veículos a que se deseja utilizar o medidor eletrônico para implementar esta metodologia de trabalho.

4.12. Massas específicas dos combustíveis utilizados

De acordo com Anp (2017) não existe um valor padronizado para a massa específica da mistura de gasolina e etanol 27% \pm 1 (E27). Entretanto conforme Sindi petróleo (2015) esta massa específica, ρ , normalmente possui o valor entre 726,5 e 731,3 kg/m³ para a faixa de temperatura dos testes realizados (31°C a 37°C). Assim, neste trabalho o valor de massa específica da temperatura média dos testes, que é de 728,47 kg/m³, foi considerado para este combustível.

Conforme Sindi Petróleo (2015), a massa específica do etanol (E100) encontra-se normalmente entre os valores de 793,1 e 798,5 kg/m³ para a faixa de temperatura dos testes realizados (36°C a 42°C). Assim, neste trabalho o valor de massa específica da temperatura média dos testes, que é de 795,18 kg/m³, foi considerado para este combustível.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os valores da massa de combustível consumida foram obtidos pela balança gravimétrica e utilizados como padrão para calibração por comparação de combustível obtidos através da medição do protótipo de medição de vazão de combustível. Os tempos de injeção medidos pelo protótipo foram convertidos em massa de combustível utilizando-se do Melhor Valor de Calibração para o sistema de injeção do SCRE para cada tipo de combustível. Isto possibilitou levantar a evolução do consumo dessa massa de combustível ao longo dos 90 segundos de cada teste.

Os Melhores Valores de Calibração dos combustíveis são a melhor representação física da resposta do sistema de injeção real com todas as suas características físicas, como escoamento, oscilações de pressão, temperatura, incertezas dos dispositivos, entre outros. Isto conforme os dados disponíveis nos testes realizados, já que não se tem o modelamento matemático de todo o sistema relacionando as variáveis físicas do mesmo.

Todos os valores de calibração individuais de cada teste estão mostrados nas Tab. 6 (para Etanol) e Tab. 8 (para Gasolina). É importante notar que os valores oscilam em torno de uma média de $0,4524 \pm 0,0071 (m^3g)^{0,5}.s^{-1}$ para o Etanol (E100) foi de $0,4354 \pm 0,0072 (m^3g)^{0,5}.s^{-1}$ para a mistura Gasolina e Etanol a 27% (E27). Estes valores apontam para um valor de calibração central com uma pequena variação de incertezas.

Os melhores valores de Calibração foram aqueles que ao serem utilizados para converter todo o histórico de tempos de injeção medido pelo protótipo, apresentaram os menores valores de erros percentuais sobre todos testes realizados em seu combustível específico. Cada tipo de combustível tem seu próprio Melhor Valor de Calibração. Estes valores ótimos estão também evidenciados nas Tab. 6 e Tab. 8.

Quando realizadas as análises dos resultados obtidos com o protótipo, pôde-se observar que as medições apresentaram desvios finais de massa de, no máximo, 2,9% de erro percentual nos testes com Etanol (E100) e de 3,0% nos testes com Gasolina (E27). Esta faixa de erro é considerada condizente com resultados de outras técnicas e metodologias encontradas na literatura, sendo menores também que os desvios encontrados em alguns sensores eletromecânicos.

Observando os gráficos mostrados nas páginas adiante, nota-se que o débito de massa combustível informado pelo protótipo apresentou-se mais linearizado no tempo

do que o débito informado pela balança gravimétrica. Isto se deve ao fato de que o protótipo realiza sua medição baseada exclusivamente nos pulsos elétricos enviados do controlador de injeção para os eletro-injetores. Estes sinais, por sua vez, são muito regulares pois são gerados por um circuito digital que aciona os eletro-injetores de forma uniforme. Já os valores de massa apontados pela balança são resultados de medições do peso de combustível dentro do reservatório da mesma, e por isso estão mais sujeitos a variações e oscilações causadas por todos os fatores físicos de incerteza.

5.1. Resultados das medições para os testes em Etanol (E100)

5.1.1. Coeficiente de Calibração do Protótipo do Sistema de Medição da Vazão de Combustível, para Etanol (E100)

A Tab. 6 mostra todos os cenários de testes realizados no etanol (E100) e os Coeficientes de Calibração calculados com os dados de cada teste em particular. O melhor valor de Coeficiente de Calibração escolhido pelo critério da secção 4.11 para etanol (E100) foi ressaltado em negrito.

Tabela 6 – Coeficientes de calibração para cada cenário de teste em Etanol (E100).

Velocidade do eixo		Etanol (E100)			
		1000rpm	2000rpm	3000rpm	4000rpm
Pressão do ar de admissão	921mbar	0,4545	0,4564	0,4587	0,4619
	800mbar	0,4556	0,4523	0,4495	0,4582
	600mbar	0,4475	0,4510	0,4478	0,4555
	400mbar	0,4389	0,4358	0,4538	0,4613
Melhor valor de $C_{calibration} (\frac{\sqrt{m^3 \cdot g}}{s})$:		0,4478			

O melhor valor de Coeficiente de Calibração encontrado pelo critério exposto na secção 4.11 foi utilizado na planilha eletrônica para conversão dos tempos de injeção em massa de Etanol (E100) e gerou os gráficos mostrados nas Fig. 13 até a Fig. 16.

Assim, para o Etanol (E100) o erro percentual máximo foi igual a 2,87%, valor este que está abaixo da faixa de $\pm 10\%$ considerados normais para sensores eletromecânicos.

5.1.2. Evolução dos consumos de massa de combustível Estimados e Medidos de Etanol (E100)

As Figuras 13 a 16 mostram a evolução dos débitos de massa de combustível estimados pela balança gravimétrica e os débitos de massa medidos pelo protótipo durante os testes e ilustram respectivamente os dados coletados a 1000, 2000, 3000 e 4000 rpm, para os testes em Etanol (E100).

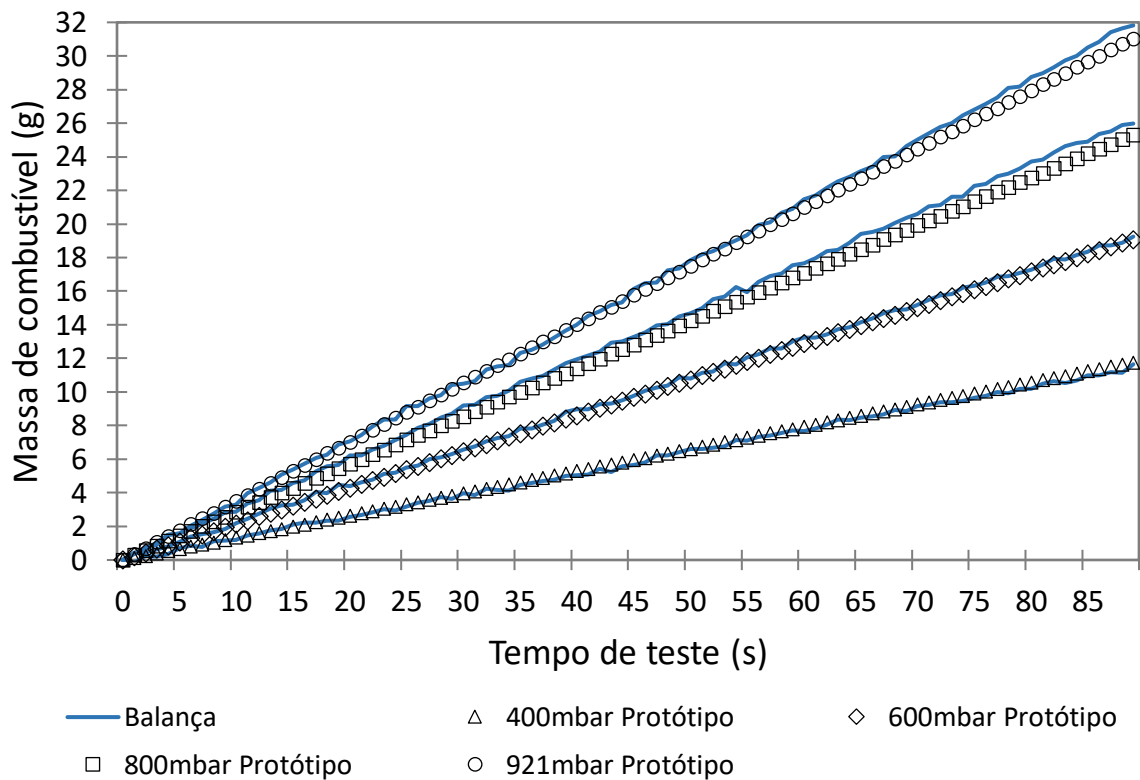


Figura 13 – Cenários de testes com Etanol (E100) a 1000rpm de velocidade

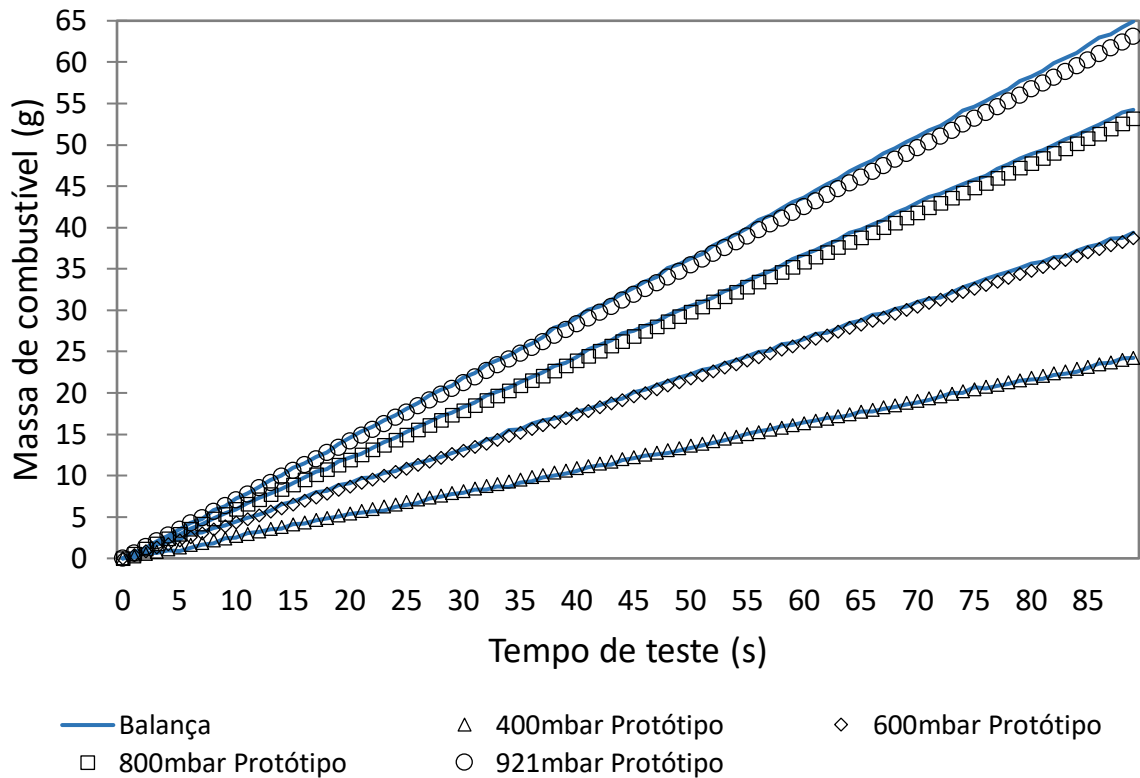


Figura 14 – Cenários de testes com Etanol (E100) a 2000rpm de velocidade

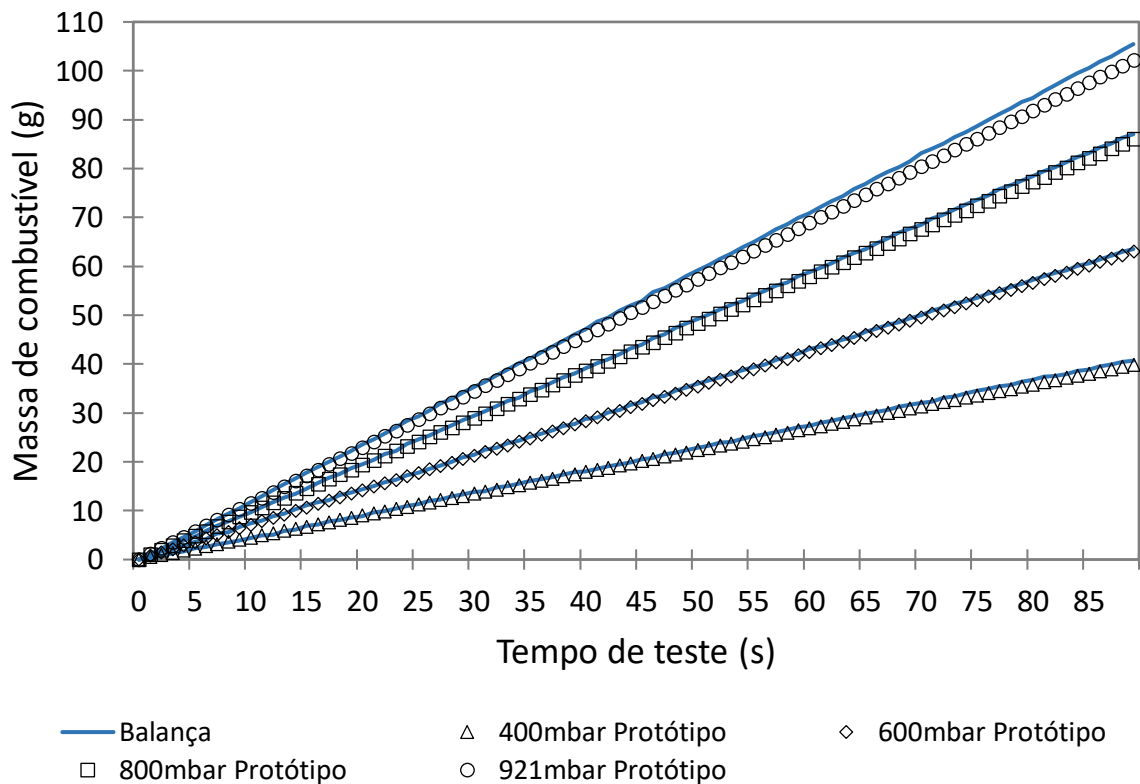


Figura 15 – Cenários de testes com Etanol (E100) a 3000rpm de velocidade

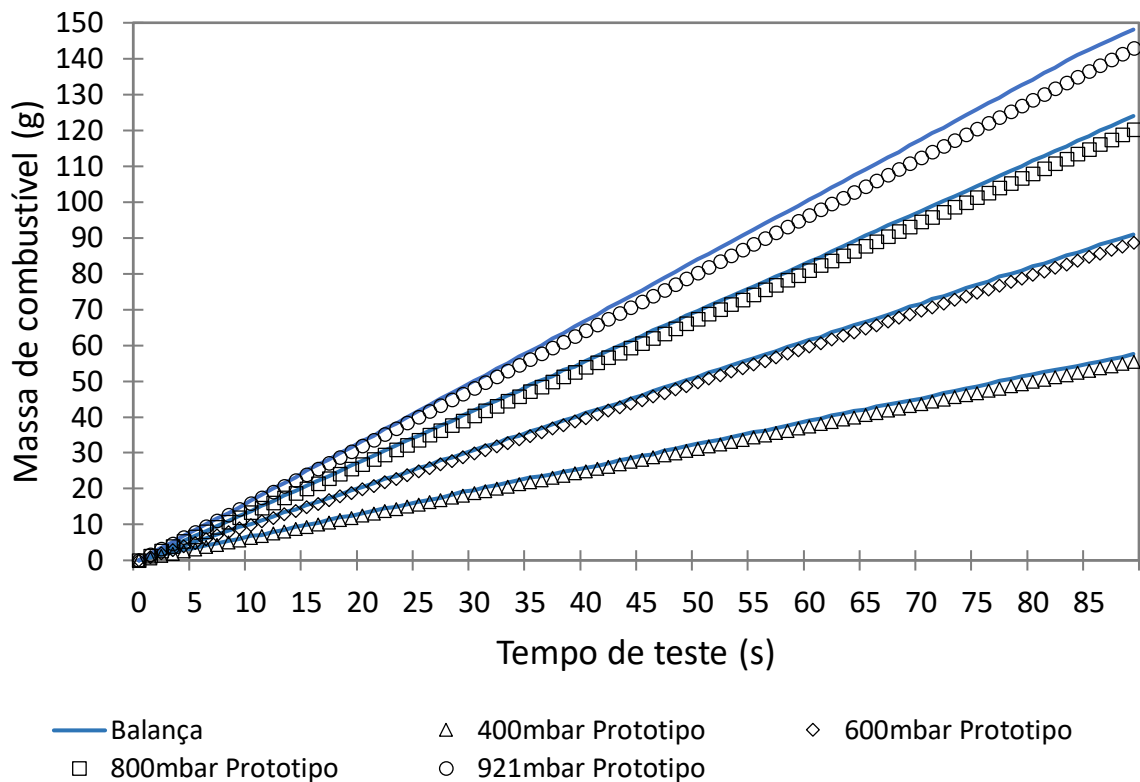


Figura 16 – Cenários de testes com Etanol (E100) a 4000rpm de velocidade

5.1.3. Erros percentuais finais do protótipo em testes com Etanol (E100)

Em relação aos resultados qualitativos, vê-se que em todos os gráficos mostrados nas Figuras 13 a 16, é possível notar que a metodologia seguiu a taxa de consumo de combustível estimada pela balança gravimétrica, uma vez que a evolução das quantidades de combustível estimada pela balança e medida pelo protótipo andaram praticamente juntas durante o andamento dos testes.

Em relação aos resultados quantitativos pode-se ver pela Tab. 7, o resultado de cálculos dos erros percentuais para cada um dos 16 cenários de teste realizados em etanol (E100).

Tabela 7 – Erro percentual total para cada cenário de teste para Etanol (E100)

Velocidade do eixo		Etanol (E100)			
		1000rpm	2000rpm	3000rpm	4000rpm
Pressão do ar de admissão	921mbar	-1,37%	-1,66%	-2,10%	-2,72%
	800mbar	-1,61%	-0,82%	-0,09%	-1,94%
	600mbar	0,11%	-0,53%	0,21%	-1,36%
	400mbar	2,03%	2,87%	-1,11%	-2,59%
Erro Percentual Máximo:		2,87%			

Para se ter uma melhor visão do que representam os erros percentuais obtidos utilizando a metodologia proposta, os resultados na Tab. 7 foram pontuados e mostrados em forma de gráfico na Fig. 17:

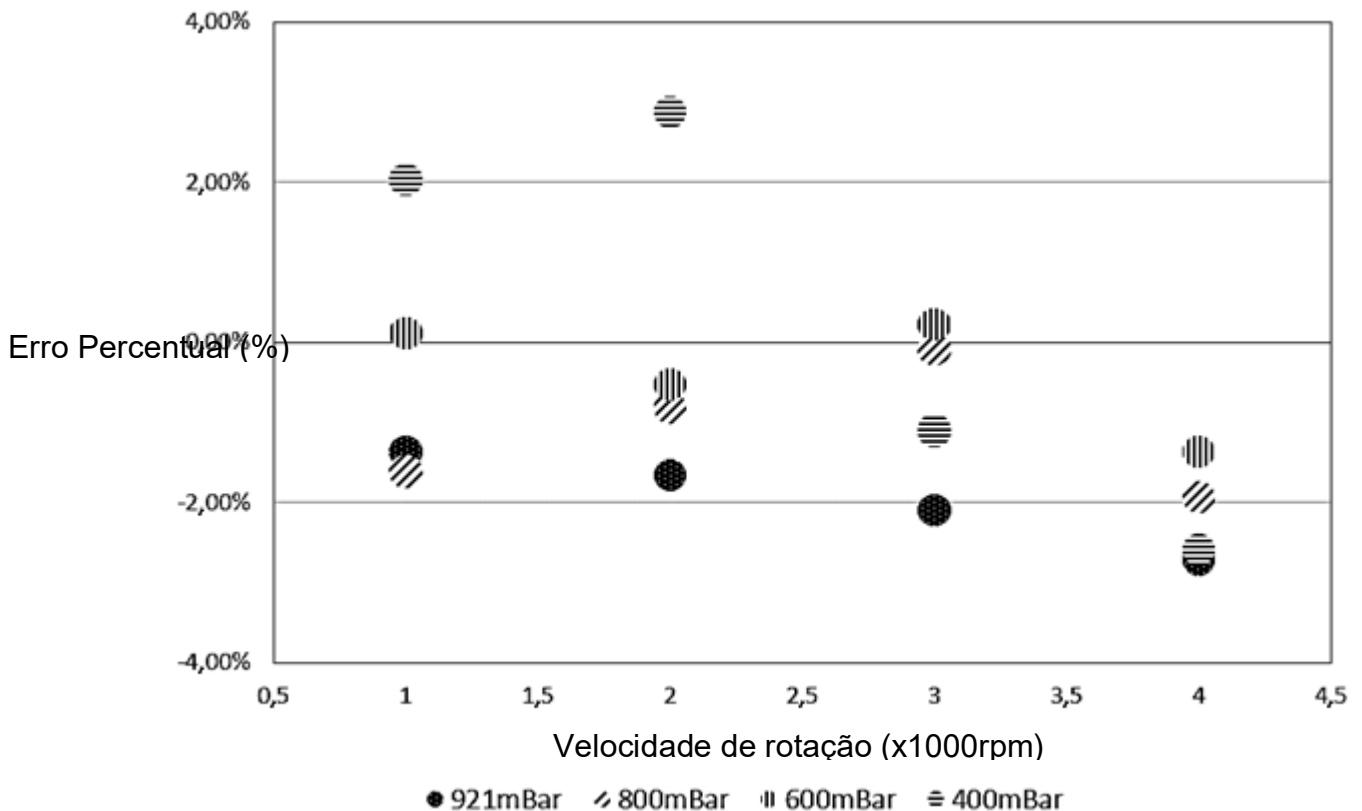


Figura 17 – Erro percentual dos 16 cenários de teste em Etanol (E100)

Outra forma interessante para visualizar o que representaram os desvios entre os valores medidos pelo protótipo e os valores de referência lidos pela balança gravimétrica, os valores foram ilustrados no gráfico da Fig. 18, que correlaciona as massas totais dos 16 testes em etanol (E100). Este gráfico coloca uma linha central representativa para o que seria o local de plotagem cujas medidas de ambas as fontes coincidem. Esta linha representativa indica onde os pontos de medição teria erro igual a zero.

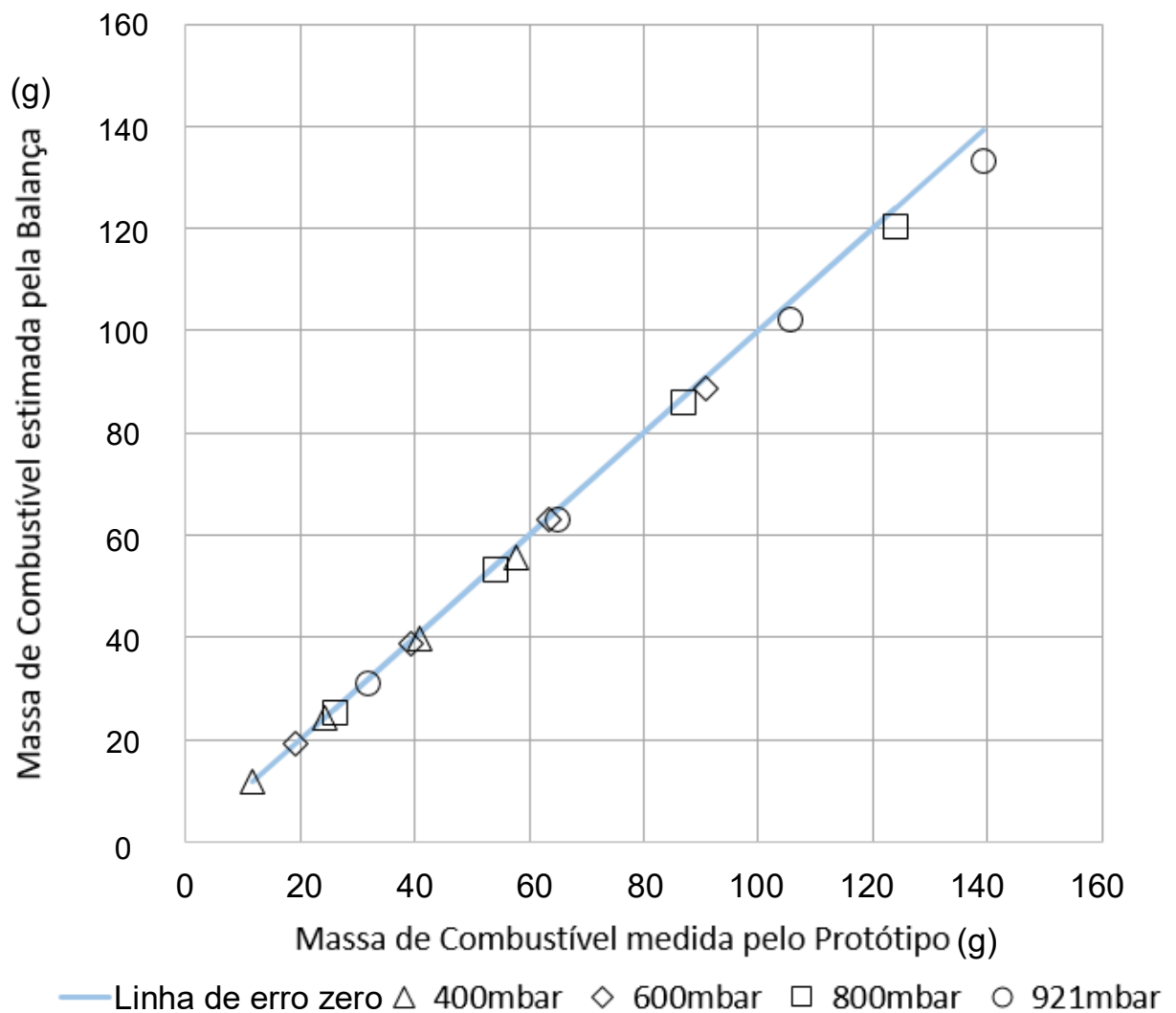


Figura 18 – Erros percentuais finais dos 16 testes realizados com Etanol (E100)

5.2. Resultados das medições para os testes em Gasolina (E27)

5.2.1. Coeficiente de Calibração do protótipo para Gasolina (E27)

A Tab. 8 mostra todos os cenários de testes realizados na Gasolina (E27) e os Coeficientes de Calibração calculados com os dados de cada teste em particular. O melhor valor de Coeficiente de Calibração escolhido pelo critério da secção 4.11 para gasolina (E27) foi ressaltado em negrito.

Tabela 8 – Coeficientes de calibração para cada cenário de teste em Gasolina (E27).

Velocidade do eixo		Gasolina (E27)			
		1000rpm	2000rpm	3000rpm	4000rpm
Pressão do ar de admissão	921mbar	0,4251	0,4446	0,4277	0,4384
	800mbar	0,4311	0,4418	0,4297	0,4372
	600mbar	0,4316	0,4374	0,4490	0,4340
	400mbar	0,4294	0,4306	0,4488	0,4296
Melhor valor de $C_{calibration} (\frac{\sqrt{m^3 \cdot g}}{s})$:		0,4488			

O melhor valor de Coeficiente de Calibração encontrado pelo critério exposto na secção 4.11 foi utilizado na planilha eletrônica para conversão dos tempos de injeção em massa de Gasolina (E27) e gerou os gráficos mostrados nas Fig. 19 até a Fig. 22.

Usando este valor de calibração como parâmetro de calibração no protótipo garantirá que o instrumento realize as medições com a menor faixa de erros, segundo o histórico de dados conseguidos pelos testes realizados.

Assim, para o Gasolina (E27) o erro percentual máximo foi igual a 3,0%, valor este que está abaixo da faixa de $\pm 10\%$ considerados normais para sensores eletromecânicos.

5.2.2. Evolução dos consumos de massa de combustível Estimados e Medidos de Gasolina (E27)

As Fig. 19 até a Fig. 22 mostram a evolução dos débitos de massa de combustível estimados pela balança gravimétrica e os débitos de massa medidos pelo protótipo durante os testes realizados e ilustram respectivamente os dados coletados a 1000, 2000, 3000 e 4000 rpm, para os testes em Gasolina (E27).

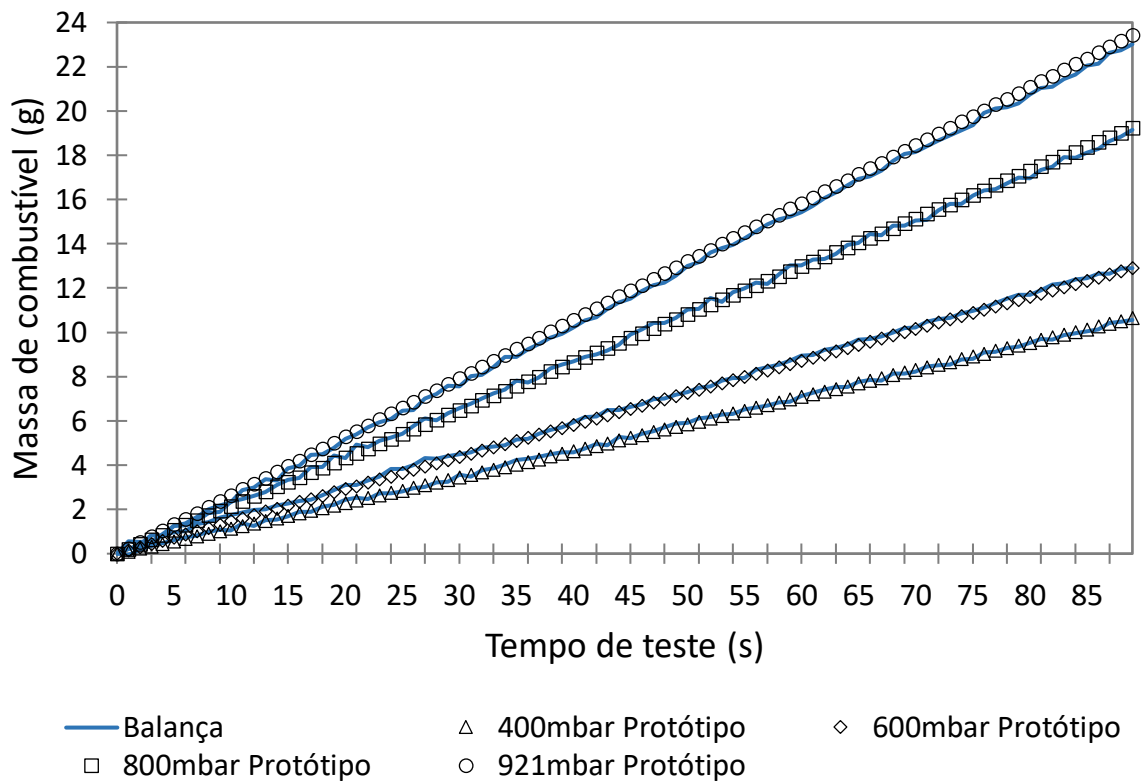


Figura 19 – Cenários de testes com Gasolina (E27) a 1000rpm de velocidade

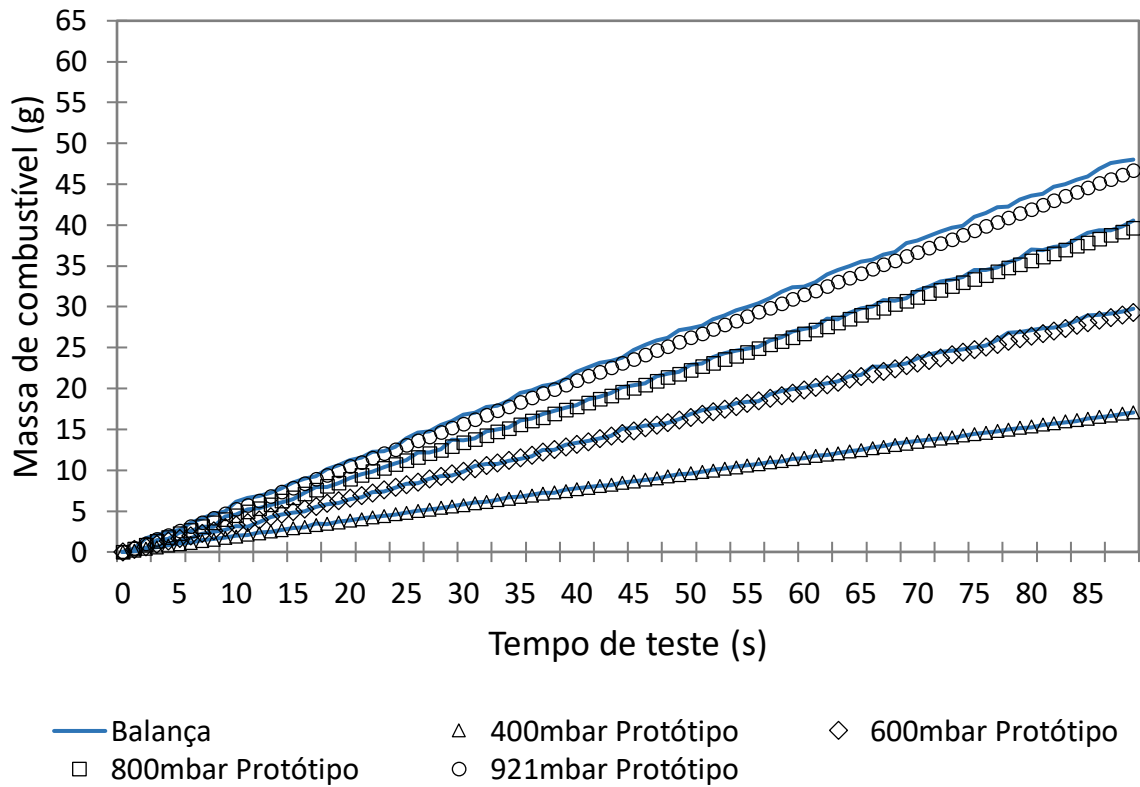


Figura 20 – Cenários de testes com Gasolina (E27) a 2000rpm de velocidade

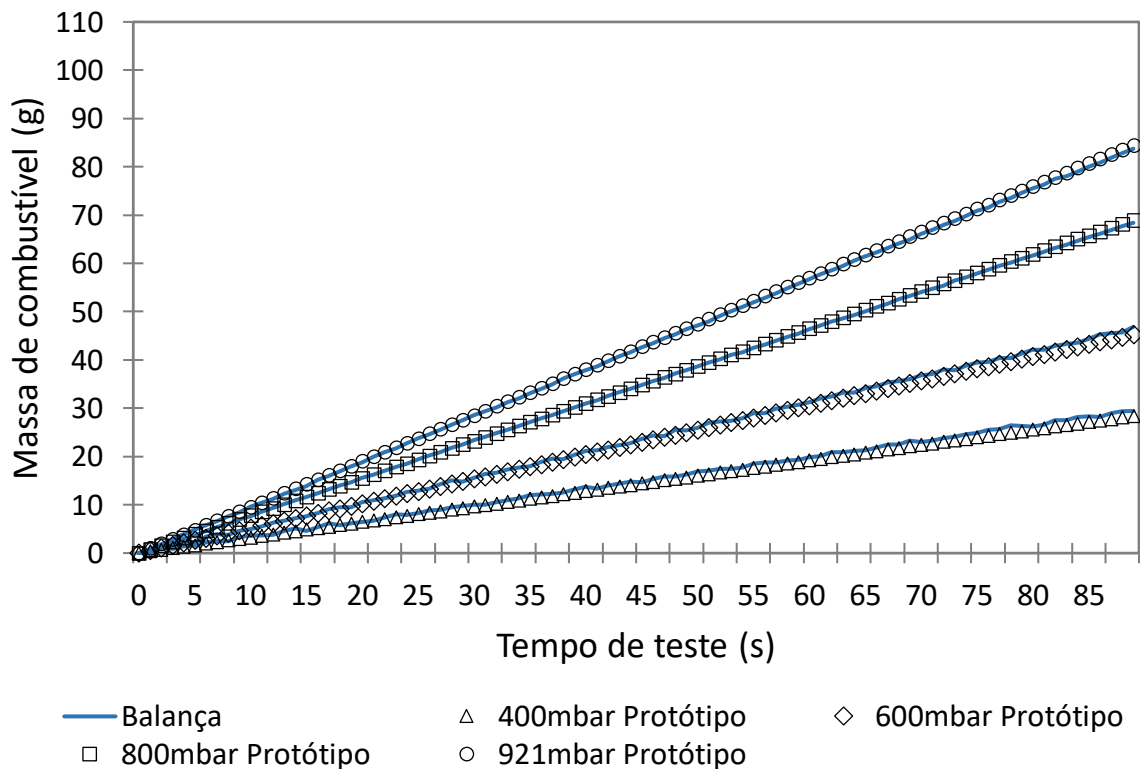


Figura 21 – Cenários de testes com Gasolina (E27) a 3000rpm de velocidade

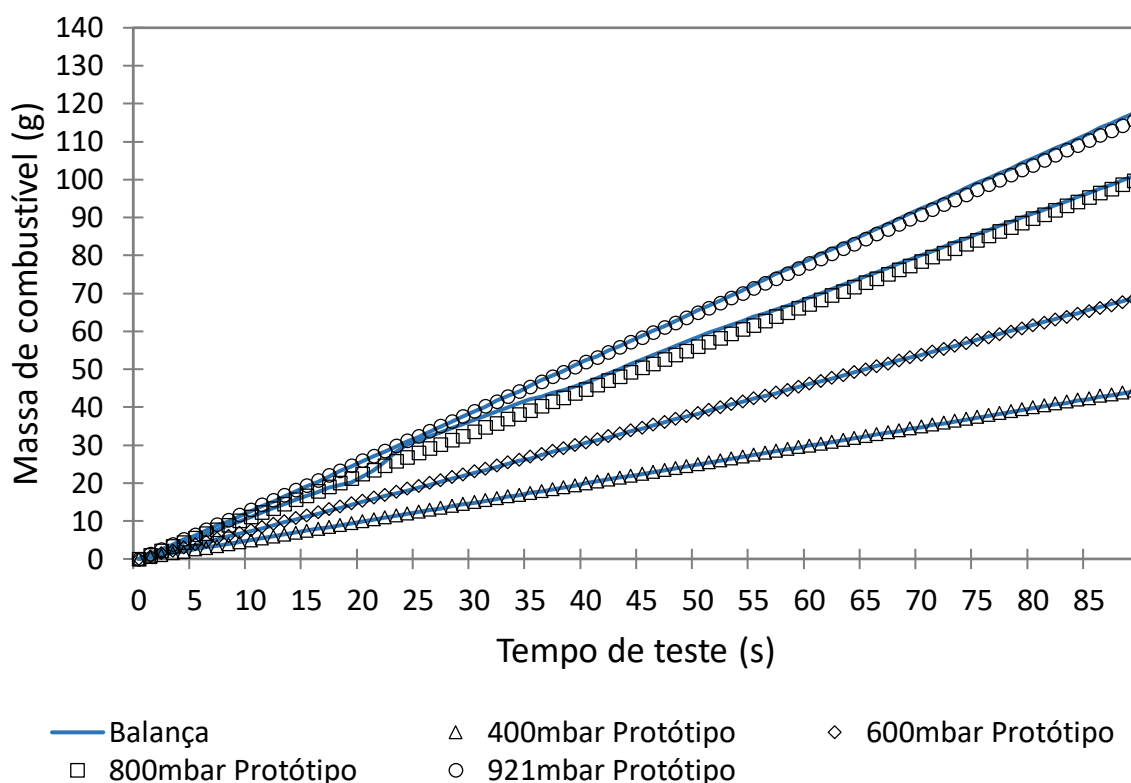


Figura 22 – Cenários de testes com Gasolina (E27) a 4000rpm de velocidade

5.2.3. Erros percentuais finais do protótipo em testes com Gasolina (E27)

Em relação aos resultados qualitativos, vê-se que em todos os gráficos mostrados nas Fig. 19 até a Fig. 22, é possível notar que a metodologia seguiu a taxa de consumo estimada pela balança gravimétrica, uma vez que a evolução das quantidades de combustível estimada pela balança e medida pelo protótipo andaram praticamente juntas durante o andamento dos testes.

Em relação aos resultados quantitativos pode-se ver pela Tab. 9, o resultado de cálculos dos erros percentuais para cada um dos 16 cenários de teste realizados em gasolina (E27).

Tabela 9 – Erro percentual total para cada cenário de teste para Gasolina (E27)

		Gasolina (E27)			
		1000rpm	2000rpm	3000rpm	4000rpm
Pressão do ar de admissão	921mbar:	2,98%	-1,69%	2,01%	-0,47%
	800mbar:	1,49%	-1,12%	1,78%	0,09%
	600mbar:	1,21%	-0,19%	-2,54%	0,77%
	400mbar:	1,91%	1,51%	-2,57%	1,89%
Erro Percentual Máximo:		2,98%			

Para se ter uma melhor visão do que representam os erros percentuais obtidos utilizando a metodologia proposta, os resultados na Tab. 9 foram pontuados e mostrados em forma de gráfico na Fig. 23.

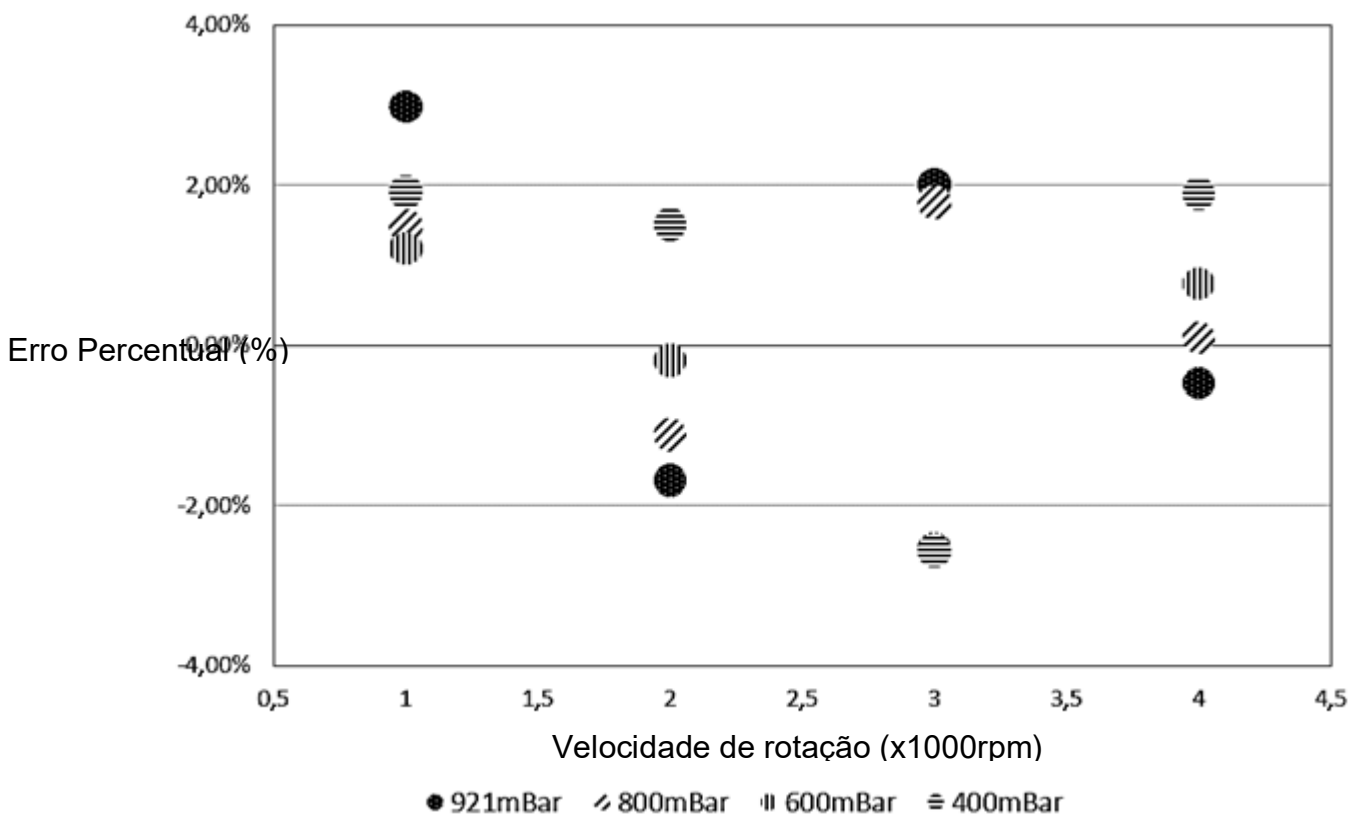


Figura 23 – Erro percentual dos 16 cenários de teste em Gasolina (E27)

Outra forma interessante de visibilidade do que representaram os desvios entre os valores medidos pelo protótipo e os valores de referência lidos pela balança gravimétrica, os valores foram ilustrados no gráfico da Fig. 24, que correlaciona as massas totais dos 16 testes em gasolina (E27). Este gráfico coloca uma linha central representativa para o que seria o local de plotagem cujas medidas de ambas as fontes coincidem. Esta linha representativa indica onde os pontos de medição teria erro igual a zero.

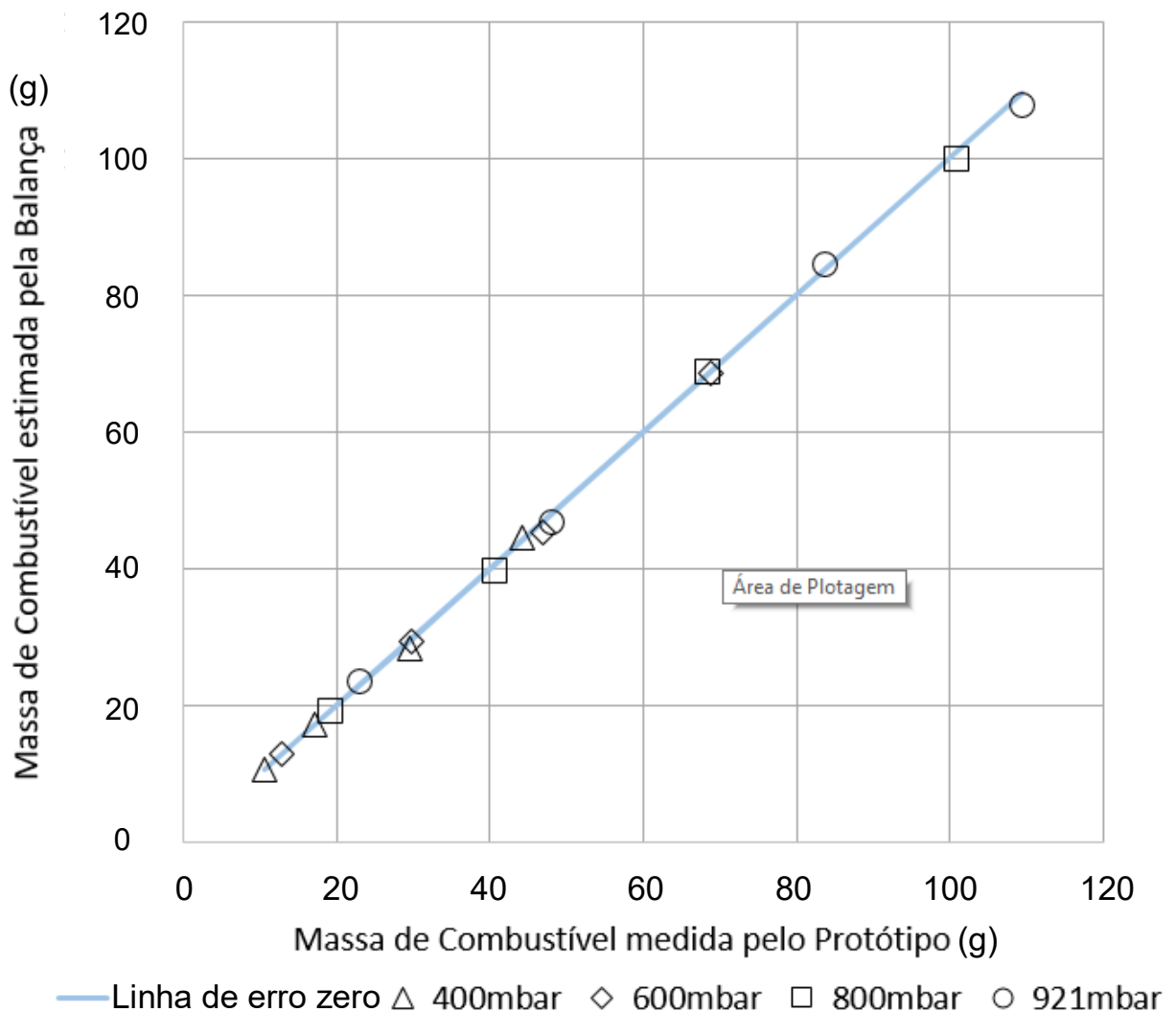


Figura 24 – Erros percentuais finais dos 16 testes realizados com Gasolina (E27)

5.3. Medição Indireta da velocidade do motor

Outra informação que pode facilmente ser disponibilizada pelo sinal elétricos coletado pelo protótipo sem adição de um sensor específico, é a velocidade do eixo do motor em rpm. Isto se torna possível porque os acionamentos do eletro-injetor são sincronizados com a rotação do virabrequim por acontecerem exatamente no momento da admissão de ar e combustível, ou seja, um dos quatro tempos de trabalho do ciclo Otto. Assim, se durante os quatro tempos o eixo do motor executa duas voltas completas, então o valor da frequência dos acionamentos dos eletro-injetores multiplicada por duas dará a rotação de eixo.

Com a informação da rotação, a análise dos dados pode ser ampliada propondo a elaboração de um gráfico em três dimensões onde pudesse ser desenhada uma superfície com os valores de erros percentuais e, nesta superfície, poder verificar as regiões com maior e menor desvios de erros.

Os dados dos testes em Etanol (E100) formam o gráfico que está ilustrado em 3D na Fig. 25.

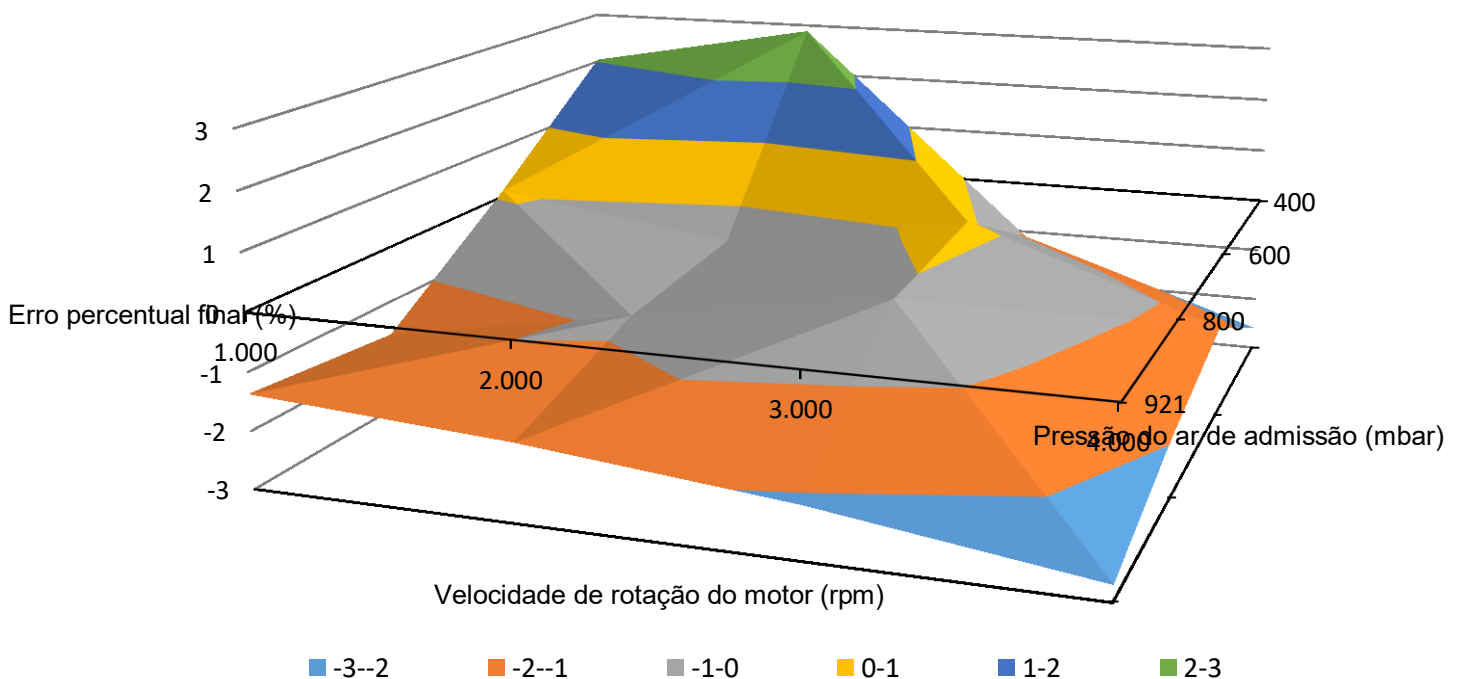


Figura 25 – Superfície de Erros Percentuais em função de rpm e pressão de admissão para testes em Etanol (E100)

Pode-se ver pela Fig. 25 é que os melhores resultados de medição aparecem nos pontos que estão na faixa de -1,0% a 1,0%.

Os dados dos testes em Gasolina (E27) formam o gráfico 3D na Fig. 26.

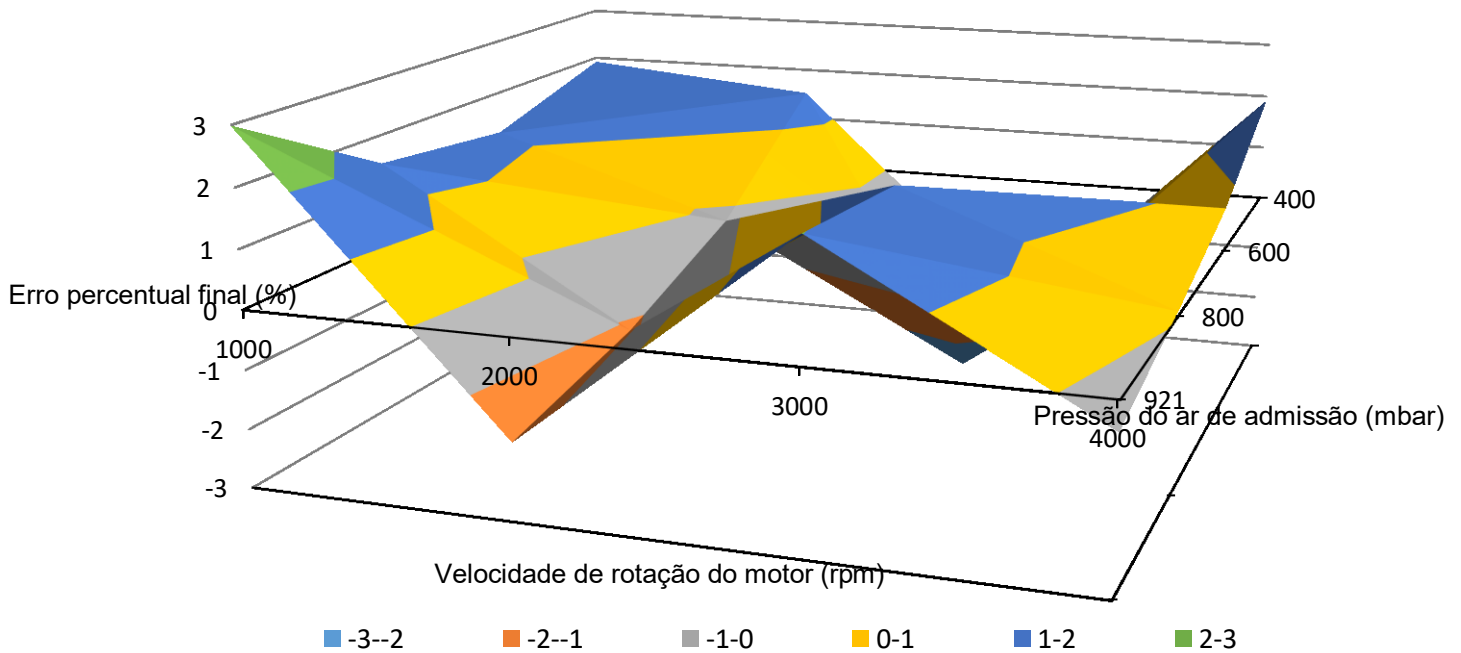


Figura 26 – Superfície de Erros Percentuais em função de rpm e pressão de admissão para testes em Gasolina (E27)

Pode-se ver pela Fig. 26 é que os melhores resultados de medição aparecem nos pontos que estão na faixa de -1,0% a 1,0%.

Os gráficos da Fig. 25 e Fig. 26 utilizam-se de três eixos para representar uma superfície que mostra o erro percentual final obtido do desvio entre as massas de combustível registradas pelas medições do protótipo de medição da vazão de combustível, e as massas de combustível indicadas pela balança gravimétrica.

Estes erros percentuais são colocados sobre um plano formado pelas variáveis de velocidade de eixo do motor e a pressão do ar de admissão. Este gráfico foi desenvolvido para tentar identificar alguma relação desse erro percentual final com estas duas outras variáveis.

6. CONCLUSÕES

A metodologia que foi proposta e desenvolvida neste documento, trazia em si o compromisso de viabilizar uma forma prática, não invasiva e simples o bastante para poder inferir, em tempo real, a vazão mássica de combustível debitada pelo motor e o quantitativo acumulado de massa consumida de combustível em um determinado período de tempo e ainda manter um satisfatório grau de precisão. Frente a isto, pode-se concluir que este compromisso foi atingido, com resultado final bastante competitivo dentre os métodos encontrados na literatura, sendo limitada apenas pelos erros e incertezas inerentes aos parâmetros físicos de dispositivos e sensores que compõem o sistema de injeção original ao qual foi inserida.

Da forma com que a metodologia proposta foi concebida, usando como base de medição os acionamentos dos eletro-injetores que vem da Central Eletrônica do motor para os eletro-injetores, faz com que a informação coletada esteja relacionada somente o montante de combustível queimado na câmara de combustão. Esta característica proporciona confiabilidade ao sistema, simplifica o processo de montagem, simplifica a instalação do aparato de hardware no veículo e simplifica os cálculos quanto ao resultado final esperado.

A metodologia proposta pode contribuir para estudos de controle e otimização do uso do combustível, de maximização do desempenho de motores em diferentes cenários de direção, otimização de rotas para veículos de frotas de transporte minimizando o consumo de combustível, também para eventuais programas de treinamento e divulgação de boas práticas de condução do veículo por parte de motoristas, permitindo a chamada eco condução, ou *Ecodrive*.

Os valores máximos de Erros Percentuais foram de $\pm 2,9\%$ para o Etanol (E100) e de $\pm 3,0\%$ para a Gasolina (E27). Estes valores, se comparados com resultados de erro percentual de sensores invasivos eletromecânicos, que podem normalmente atingir a faixa de $\pm 10\%$, apresentaram-se como uma interessante opção sob os pontos de vista de precisão, simplicidade de instalação e operação.

O protótipo apresentou um comportamento uniforme e confiável em todos os cenários de teste, mesmo atuando em uma ampla faixa de rotação e pressão de admissão. Ficou claro a independência do erro de medição em relação aos três principais parâmetros, a velocidade do motor, e a pressão do ar de admissão de admissão, e à repetitividade de atuação do eletro-injetor, pois foi possível identificar,

em nenhum dos gráficos, uma influência desses parâmetros na baixa oscilação dos resultados. Seus formatos distintos indicam que se houvesse uma dependência, os formatos de ambas seriam semelhantes. Por isso, a implementação do cálculo da informação de rpm no *firmware* seria apenas para caráter informativo, e não seria levado em conta em nenhum processo de otimização do resultado.

A independência dos resultados às variáveis de velocidade de rotação, pressão do ar de admissão, e da repetitividade de atuação dos eletro-injetores, na verdade é uma vantagem para a metodologia, pois significa que a mesma impõe sua precisão e exatidão independentemente da forma de condução do veículo, ou mesmo da carga mecânica sob a qual está submetido o eixo do motor.

Em relação aos Coeficientes de calibração, pode-se concluir que para se ter um produto final de mercado que implemente e ofereça a metodologia desenvolvida neste trabalho, basta que seja elaborado um banco de dados com valores de $C_{calibração}$ para cada marca e modelo de veículo a que se queira instalar o dispositivo. Desse modo, tornar-se-á possível a utilização do equipamento pois ele será capaz de medir a quantidade de massa de combustível consumida, em tempo real e ao longo do tempo, com boa precisão.

Trabalhos Futuros

Futuramente o sistema de medição proposto poderá ser implementado de forma embarcada, em um invólucro lacrado, com estanqueidade suficiente para poder ser alojado dentro do compartimento do motor. Desse invólucro poderá sair um chicote de fios que captarão os sinais elétricos que comandam todos os eletro-injetores, e também os cabos de alimentação positivo e negativo da bateria, para alimentação do circuito.

Os dados poderão ser transmitidos sem fio para um dispositivo móvel. Isto possibilitará a captura dos dados para um sistema local instalado em um aplicativo dentro do dispositivo móvel, ou mesmo ser armazenado em um sistema mantido na nuvem, que faria análises posteriores e geração de relatórios diversos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDRIA, G *et al.* Development of an automotive data acquisition platform for analysis of driving behavior. *Measurement*, v. 93, p. 278–287, 2016. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263224116303943>>.
- ANP. Resolução ANP nº 684/2017. 2017, [S.l.]: ANP - Agência Nacional de Petróleo (Brasil), 2017. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br>>.
- ASAD, Usman *et al.* Precise instrumentation of a diesel single-cylinder research engine. *Measurement*, v. 44, n. 7, p. 1261–1278, 2011. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263224111001163>>.
- AUTODESK. *EAGLE*. . [S.l.: s.n.]. Disponível em: <<https://www.autodesk.com/education/free-software/eagle>>. , [S.d.]
- AVL LIST GMBH. *Operating Manual - AVL 733S Dynamic Fuel Meter*. . [S.l.: s.n.]. , 1997
- AZAM, A. M.I.N. *et al.* Parametric study on direct ethanol fuel cell (DEFC) performance and fuel crossover. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 44, n. 16, p. 8566–8574, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.08.121>>.
- CARVALHO, Márcio Augusto Sampaio De. *Avaliação de um motor de combustão interna ciclo otto utilizando diferentes tipos de combustíveis*. 2011. 168 f. 2011. Disponível em: <[https://repositorio.ufba.br/ri/bitstream/ri/18744/1/Dissertação de Mestrado _PEI_Márcio Carvalho.pdf](https://repositorio.ufba.br/ri/bitstream/ri/18744/1/Dissertação%20de%20Mestrado_PEI_M%C3%A1rcio%20Carvalho.pdf)>.
- CATERPILLAR. Diesel Fuel & Diesel Fuel Systems. *Caterpillar - Application and Installation guide*, n. p 1879, p. 1882–1883, 2013. Disponível em: <https://www.capitalmachinery.com.tw/upload/day_151021/201510211449054666.pdf>.
- CCS. *CCS Compiler*. Disponível em: <<http://www.ccsinfo.com/>>. Acesso em: 2 jan. 2019.
- CCS. *CCS Compiler Demo Version*. Disponível em: <<http://www.ccsinfo.com/ccsfreedemo.php>>. Acesso em: 2 jan. 2019.
- CHALET, David *et al.* Nodal modelling for advanced thermal-management of internal combustion engine. *Applied Energy*, v. 190, p. 99–113, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.12.104>>.
- DU, Yiman *et al.* Predicting vehicle fuel consumption patterns using floating vehicle data. *Journal of Environmental Sciences*, v. 59, p. 24–29, 2017. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1001074216313808>>.
- ENDO, N.; FUKUI, T.; SASAKI, T. Electronic Control of Fuel Injection for Passenger Car Gasolina Engine. *IFAC Proceedings Volumes*, v. 14, n. 2, p. 2161–2168, 2017. Disponível em: <[http://dx.doi.org/10.1016/S1474-6670\(17\)63790-X](http://dx.doi.org/10.1016/S1474-6670(17)63790-X)>.

ESPINOSA, Felipe *et al.* Design and implementation of a portable electronic system for vehicle-driver-route activity measurement. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, v. 44, n. 2, p. 326–337, 2011.

FAROOQI, Q. R.; SNYDER, B.; ANWAR, S. Real time monitoring of diesel engine injector waveforms for accurate fuel metering and control. *Journal of Control Science and Engineering*. [S.l: s.n.], 2013

FERRARI, A.; PAOLICELLI, F. An indirect method for the real-time evaluation of the fuel mass injected in small injections in Common Rail diesel engines. *Fuel*, v. 191, p. 322–329, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2016.11.053>>.

FIGLIOLA, RICHARD S., Donald E. Beasley. *Theory and Design for Mechanical Measurements*. 5th. ed. Danvers: John Wiley & Sons, Inc., 2011. Disponível em: <<http://www.hljp.edu.cn/attachment/20120831082417983.pdf>>.

FOX, Robert W.; MCDONALD, Allan T.; PRITCHARD, Philip J. *Introdução à Mecânica dos Fluidos*. 8a. ed. Rio de Janeiro: [s.n.], 2014.

FURLETEC. *FLOWFUEL30L0 - Diesel and Gasolina Flow Sensor*. Disponível em: <<http://www.furtec.com/FLOWFUEL30L0.shtml>>. Acesso em: 21 nov. 2017.

GARRETT, T.K.; NEWTON, K.; STEEDS, W. Petrol injection systems. *Motor Vehicle*, v. 47, n. 6, p. 424–478, 2007.

GONÇALVES, Felipe Gabardo *et al.* Operating frequency of commercial microcontrollers. *Congresso Nacional de Metrologia - 2015*. Curitiba: [s.n.], [S.d.].

GUIMARÃES, Alexandre de Almeida. *Eletrônica Embarcada Automotiva*. 1a Ed. ed. [S.l.]: Editora Érica, 2011. Disponível em: <<http://www.editorasaraiva.com.br/produtos/show/isbn:9788536501574/titulo:eletronica-embarcada-automotiva/>>.

HAKIMELAHI, Ali *et al.* Fuel Consumption Monitoring for Travel Demand Modeling. *Transportation Research Procedia*, v. 17, n. December 2014, p. 703–712, 2016. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2352146516307426>>.

HARANTOVÁ, Veronika *et al.* Estimation of fuel consumption based on data from opening fuel injector valve. *Transportation Research Procedia*, v. 40, p. 236–243, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.trpro.2019.07.036>>.

HERDZIK, Jerzy. Determination of common rail injector flow characteristics with the use of diesel and biodiesel fuels. *Journal of KONES*, v. 23, n. 3, p. 1–6, 2016. Disponível em: <<http://doi.org/10.5604/12314005.1217240>>.

HEYWOOD, John B. *Internal Combustion Engine Fundamentals*. [S.l: s.n.], 2018.

HWANG, Joonsik *et al.* Fuel temperature influence on spray and combustion characteristics in a constant volume combustion chamber (CVCC) under simulated engine operating conditions. *Fuel*, v. 160, p. 424–433, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2015.08.004>>.

INCROPERA, Frank P. *et al. Fundamentals of heat and mass transfer*. 5a Edição ed. [S.l.]: Hoboken, NJ: John Wiley, 2007.

ISERMANN, Rolf; MÜLLER, Norbert. Design of computer controlled combustion engines. *Mechatronics*, v. 13, n. 10 SPEC., p. 1067–1089, 2003.

KEYSIGHT TECHNOLOGIES. *1146B 100 kHz/100 A Current Probe*. Disponível em: <<https://www.keysight.com/pt/pd-2329609-pn-1146B/100-khz-100-a-4-current-probe?nid=-32553.1066112&cc=BR&lc=por>>. Acesso em: 15 fev. 2019.

LI, Cong *et al.* Effect of low temperature boundary on fuel distribution of pool fires on an immiscible sub-layer. *Experimental Thermal and Fluid Science*, v. 104, n. March, p. 221–228, 2019.

MARCIC, Milan. A new method for measuring fuel-injection rate. *Flow Measurement and Instrumentation*, v. 10, n. 3, p. 159–165, 1999.

MICROCHIP TECHNOLOGY INC. *PicKit3 Software*. Disponível em: <<https://www.microchip.com/development-tools/pic-and-dspic-downloads-archive>>. Acesso em: 19 ago. 2018.

MICROCHIP TECHNOLOGY INC. *PICkit™ 3 In-Circuit Debugger/Programmer User's Guide For MPLAB® X IDE*. [S.l.: s.n.], 2013.

MURTA, Bernardo Junqueira. *IMPACTO DO ESTILO DE CONDUÇÃO NO CONSUMO DE COMBUSTÍVEL E NAS EMISSÕES VEICULARES*. 2018. Universidade Federal de Minas Gerais, 2018.

ORFILA, O. *et al.* Fast computing and approximate fuel consumption modeling for Internal Combustion Engine passenger cars. *Transportation Research*, v. 50, p. 14–25, 2016.

PAYRI, R. *et al.* Fuel temperature influence on the performance of a last generation common-rail diesel ballistic injector. Part II: 1D model development, validation and analysis. *Energy Conversion and Management*, v. 114, p. 376–391, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2016.02.043>>.

PEREIRA, Fábio. *Microcontroladores PIC – Programação em C*. [S.l.]: Editora Érica, 2009. Disponível em: <<http://www.editorasaraiva.com.br/produtos/show/isbn:9788571949355/titulo:microcontroladores-pic-programacao-em-c/>>.

POPE, Jodie G; WRIGHT, John D. Performance of Coriolis meters in transient gas flows. *Flow Measurement and Instrumentation*, v. 37, p. 42–53, 2014.

PROLIFIC. *PL-2303HX Edition (Chip Rev D) USB to Serial Bridge Controller Product Datasheet*. [S.l.: s.n.], 2012.

SACCO, Francisco. *Níveis e limites de tensões digitais*. Disponível em: <<https://www.embarcados.com.br/niveis-e-limites-de-tensoes-digitais/>>. Acesso em: 31 dez. 2019.

SAFAROV, Javid *et al.* Thermophysical properties of Diesel fuel over a wide range of temperatures and pressures. *Fuel*, v. 216, n. October 2017, p. 870–889, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.11.125>>.

SALOMATOV, Vladimir *et al.* Effect of high-temperature gas flow on ignition of the water-coal fuel particles. *Combustion and Flame*, v. 203, p. 375–385, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2019.02.025>>.

SENSOTEK, Broil. *Products Broil Sensotek*. Disponível em: <<http://www.broiltech.com/application/fuel/38>>. Acesso em: 21 nov. 2017.

SINDI PETRÓLEO. *Testes de Qualidade - Tabelas de Conversões de Produtos*. [S.l.: s.n.], 2015.

SZPICA, Dariusz. Investigating fuel dosage non-repeatability of low-pressure gas-phase injectors. *Flow Measurement and Instrumentation*, v. 59, n. August 2017, p. 147–156, 2018a. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2017.12.009>>.

SZPICA, Dariusz. Validation of indirect methods used in the operational assessment of LPG vapor phase pulse injectors. *Measurement*, v. 118, p. 253–261, 2018b. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263224118300587>>.

TATHAM, Simon. *PuTTY Terminal*. Disponível em: <<https://www.putty.org/>>. Acesso em: 2 jan. 2019.

TECNOLOGY INC., Microchip. *PIC18FXX2 Data Sheet - High-Performance, Enhanced Flash, Microcontrollers with 10-Bit A/D*. Disponível em: <<https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/39564c.pdf>>. Acesso em: 16 fev. 2019.

TEIXEIRA, Alysson Fernandes. *Especificações Técnicas do Banco de Provas e Monocilindro de Pesquisa do CTM-UFMG*. [S.l.: s.n.], 2017.

TURKOWSKI, Mateusz; DYAKOWSKA, Eliza; JAKUBIAK, Tomasz. Construction of the new gas meter high pressure calibration facility – Technical and metrological problems. *Flow Measurement and Instrumentation*, v. 60, n. October 2017, p. 57–66, 2018.

WANG, Bin; DU, Yihao; XU, Nanyue. Simulation and experimental verification on dynamic calibration of fuel gear flowmeters. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, v. 138, p. 570–577, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.02.044>>.

WANG, Jinghui; RAKHA, Hesham A. Fuel consumption model for conventional diesel buses. *Applied Energy*, v. 170, p. 394–402, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.02.124>>.

WANG, Jinghui; RAKHA, Hesham A. Fuel consumption model for heavy duty diesel trucks: Model development and testing. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, v. 55, p. 127–141, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.trd.2017.06.011>>.

YUAN, Yuan; ZHANG, Tianhong; LIN, Zhonglin. An investigation into factors determining the metering performance of a fuel control unit in an aero engine. *Flow Measurement and Instrumentation*, p. 101672, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2019.101672>>.

YUSUF, Abdulfatah Abdu; INAMBAO, Freddie L. Effect of cold start emissions from Gasolina-fueled engines of light-duty vehicles at low and high ambient temperatures: Recent trends. *Case Studies in Thermal Engineering*, v. 14, n. February, p. 100417, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.csite.2019.100417>>.

ZHAO, Hua. *Advanced direct injection combustion engine technologies and development*. [S.l: s.n.], 2018.