

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Igor Rodrigues dos Santos

**DESENVOLVIMENTO DE UM SOFTWARE DE INDICAÇÃO PARA
MONITORAMENTO E ANÁLISE DE COMBUSTÃO EM TEMPO REAL**

Santa Maria, RS
2020

Igor Rodrigues dos Santos

**DESENVOLVIMENTO DE UM SOFTWARE DE INDICAÇÃO PARA
MONITORAMENTO E ANÁLISE DE COMBUSTÃO EM TEMPO REAL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Mecânica, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Engenheiro Mecânico**.

Orientador: Prof. Macklini Dalla Nora, PhD.

Santa Maria, RS
2020

Igor Rodrigues dos Santos

**DESENVOLVIMENTO DE UM SOFTWARE DE INDICAÇÃO PARA
MONITORAMENTO E ANÁLISE DE COMBUSTÃO EM TEMPO REAL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Engenheiro Mecânico**.

Aprovado em 10 de outubro de 2020:

Macklini Dalla Nora, PhD. (UFSM)
(Presidente/Orientador)

João Felipe de Araujo Martos, Dr. (UFSM)

André Nakaema Aronis, Eng. (UPV)

Santa Maria, RS
2020

DEDICATÓRIA

Dedico esse trabalho:

- Aos meus pais

- A minha família

- Aos meus amigos

- A todos aqueles que depositaram confiança e amor em mim

AGRADECIMENTOS

Esse trabalho só pôde ser realizado e concluído, pois tive vocês e foram vocês.

Sou grato a *Deus* e ao *Universo*, por terem me dado muito mais do que preciso para ser quem sou.

Sou grato aos meus pais, *Laurete* e *Geraldo*, por terem me dado o amor necessário para não desistir e a sabedoria necessária para saber a direção onde seguir.

Sou grato a minha *família*, que sempre fizeram de tudo para me ver bem.

Sou grato aos meus amigos do coração, *Cacau*, *Ju*, *Manu* e *Ike*, por serem os melhores amigos do universo que me forneceram amor nos momentos mais difíceis da minha jornada.

Sou grato as minhas amigas, *Jenifer Oliveira* e *Franciele Ramos*, por serem meus portos seguros em todos os momentos da minha vida. Obrigado por tanto amor.

Sou eternamente grato, ao meu irmão do coração, *Rafael Barcellos*, pois sem os seus ensinamentos e conselhos, esse trabalho nunca seria concluído.

Sou grato aos meus amigos, *Leonardo Sonogo* e *Maria Fernanda*, por serem meus fiéis companheiros na busca pela sabedoria, trilhando um caminho de amor e amizade. Vocês foram as minhas inspirações para sempre dar mais de mim. Obrigado.

Sou grato aos meus irmãos de outra vida, *Macklini* e *Thompson*, que com muito amor, me ensinaram que não basta saber ciência, tem que saber ser humano.

Sou grato ao professor *Mário* e a professora *Nina* por terem me oportunizado e orientado na realização desse grande trabalho.

Sou grato ao Grupo de Pesquisa em Motores, Combustíveis e Emissões, *GPMOT*, por ter me oportunizado a aprender tanto nesses anos de convivência.

Sou grato aos meus amigos e colegas de laboratório, em especial para *Juliano Silveira*, *Filipe Herzer*, *Guilherme Zulian*, *Douglas Pinto*, *Valdemir Jr.*, *Geovane Prante*, *Joelson Bilhão* e *Roberto Garlet*, por todo suporte técnico e tecnológico para a realização desse trabalho.

Sou grato aos amigos que fiz ao longo dessa jornada, *Bruno Bordignon*, *Humberto Fernandez*, *Felipe Correa*, *Helena Motta* e *Julia Beltrame*, por tantos momentos inesquecíveis vividos juntos. Obrigado pela nossa amizade.

Sou grato por todas as pessoas que passaram pela minha vida, as quais me deixaram de herança todo o aprendizado que me tornou quem hoje sou.

*Sei o que devo ser e ainda não sou, mas
rendo graças a deus por estar trabalhando,
embora lentamente, por dentro de mim
próprio, para chegar, um dia, a ser o que
devo ser.*

(Chico Xavier)

RESUMO

DESENVOLVIMENTO DE UM SOFTWARE DE INDICAÇÃO PARA MONITORAMENTO E ANÁLISE DE COMBUSTÃO EM TEMPO REAL

AUTOR: Igor Rodrigues dos Santos
ORIENTADOR: Macklini Dalla Nora

Diante da grande demanda ambiental, social e econômica em se ter significativos avanços tecnológicos nos motores de combustão interna (MCI), o uso da indicação de pressão no processo desenvolvimento se torna imprescindível. Entretanto, a inflexibilidade e incompatibilidade dos softwares de indicação comerciais, inviabilizam a pesquisa e o desenvolvimento (P&D) em sistemas simples, de baixo custo e com instrumentação limitada. Nesse sentido, um software de indicação aplicável a esses sistemas foi desenvolvido nesse trabalho. Para isso, foram levantadas as necessidades básicas do software de indicação, as quais foram transformadas em métricas na forma de requisitos de software. A partir desses requisitos, a arquitetura do software foi estruturada e então foram elaborados os seus componentes e as suas unidades funcionais. O projeto do software então foi implementado e seu produto verificado frente as especificações demandadas pelos requisitos de software para atender as necessidades básicas de um software de indicação. Após a etapa de verificação, o software foi validado em ensaio de motor em laboratório, onde mostrou ser capaz de possibilitar o monitoramento e a aquisição de dados do experimento em tempo real. Finalmente, as características arquiteturais do software desenvolvido, tornam-no uma poderosa ferramenta aplicável aos mais variados sistemas de indicação. Possibilitando assim, a pesquisa e o desenvolvimento em sistemas de indicação simples, de baixo custo e de instrumentação limitada. Ambientes comuns em pequenas empresas, centros de pesquisas, oficinas e instituições de ensino no Brasil.

Palavras-chave: Software de Indicação. Motores de Combustão Interna. Sistema de Medição.

ABSTRACT

DEVELOPMENT OF AN INDICATING SOFTWARE FOR REAL-TIME COMBUSTION MONITORING AND ANALYSIS

**AUTHOR: IGOR RODRIGUES DOS SANTOS
ADVISOR: MACKLINI DALLA NORA**

In view of the great environmental, social and economic demand for having significant technological advances in internal combustion engines (ICEs), the use of pressure indication in the development process becomes essential. However, the inflexibility and incompatibility of commercial indication software, make research and development (R&D) unfeasible in simple, low-cost with limited instrumentation systems. In this sense, an indication software applicable to these systems was developed in this work. For this, the basic needs of the indication software were raised, which were transformed into metrics in the form of software requirements. From these requirements, the software architecture was structured and then its components and functional units were elaborated. The software design was then implemented and its product was checked against the specifications demanded by the software requirements to meet the basic needs of a indicating software. After the verification step, the software was validated in an engine test in laboratory, where it proved to be able to enable monitoring and data acquisition of the experiment in real time. Finally, the architectural characteristics of the developed software, make it a powerful tool applicable to the most varied indication systems. Thus enabling research and development in simple, low-cost and with limited instrumentation, indication systems. Common environments in small companies, research centers, workshops and educational institutions in Brazil.

Keywords: Indicating Software. Internal Combustion Engines. Measurement System.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Visão geral das principais tecnologias em desenvolvimento para enfrentar os desafios técnicos para os futuros motores automotivos.	18
Figura 2 – Áreas de aplicação da indicação de pressão.	19
Figura 3 – Sistema típico de indicação aplicado a cadeia essencial de medição da pressão do cilindro	21
Figura 4 – Cadeia principal de medição da pressão do cilindro.	31
Figura 5 – Diagrama de atividades do Modelo V.	35
Figura 6 – Arquitetura e fluxo de dados do sistema.	35
Figura 7 – Fluxograma de atividades realizadas no processo de desenvolvimento do software de indicação.	39
Figura 8 – Arquitetura do software desenvolvida.	47
Figura 9 – Algoritmo global da unidade de Operação do Software.	49
Figura 10 – Fluxograma do equacionamento e cálculos.	52
Figura 11 – Algoritmo da etapa e Processamento e Exibição.	56
Figura 12 – Codificação para identificação de ensaio.	58
Figura 13 – GUI do Painel de Controle desenvolvida.	61
Figura 14 – Comportamento do tempo de execução ao longo das 100 mil iterações de execução em cada teste.	65
Figura 15 – GUI do Repositório de Experimentos desenvolvida.	66
Figura 16 – Resultado da inserção de pacotes de dados no BDRE.	66
Figura 17 – Resultado da exportação.	67
Figura 18 – GUI do Cadastro de Experimentos desenvolvida.	68
Figura 19 – GUI da Configuração do DAQ desenvolvida.	68
Figura 20 – Produto do ensaio de aceitação realizado.	70

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Usuais representações gráficas dos dados de pressão medidos.	26
Quadro 2 – Caracterização do processo de combustão via curva de Fração de Massa Queimada.	29
Quadro 3 – Casos ensaiados para realização dos testes funcionais.	38
Quadro 4 – Motor ensaiado no teste de aceitação.	39
Quadro 5 – Especificação dos PCs utilizados no desenvolvimento e no ensaio.	40
Quadro 6 – Desejos essenciais identificados.	42
Quadro 7 – Tradução dos desejos do usuário em requisitos do usuário.	42
Quadro 8 – Transformação dos requisitos do usuário em requisitos do software.	43
Quadro 9 – Divisão dos requisitos de software de acordo com seu respectivo âmbito.	44
Quadro 10 – Divisão dos componentes em unidades funcionais.	45
Quadro 11 – Estrutura de dados elaboradas.	47
Quadro 12 – Botões definidos para a unidade funciona de Operação do Software.	48
Quadro 13 – Indicadores e diagramas escolhidos para exibição.	51
Quadro 14 – Lista de informações do formulário do Cadastro de Experimentos.	59
Quadro 15 – Informações necessários do DAQ para o Painel de Controle.	60
Quadro 16 – Resultados de diferença absoluta dos métodos de referenciamento do ciclo e do referenciamento da pressão.	62
Quadro 17 – Resultados de diferença absoluta do método de estimativa do coeficiente politrópico.	63
Quadro 18 – Resultados de tempo de execução para etapa de processamento e exibição do loop de aquisição.	64
Quadro 19 – Resumo da planilha do ensaio realizado no teste de aceitação.	70
Quadro 20 – Requisitos mínimos de hardware do sistema.	74
Quadro 21 – Requisitos mínimos de hardware e software do computador.	74
Quadro 22 – Propriedade dos objetos.	91

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Especificações dos requisitos do software.	44
Tabela 2 – Medidas de complexidade da GUI do Painel de Controle.	61
Tabela 3 – Comparação dos valores nominais obtidos e as especificações dos requisitos do software.	69
Tabela 4 – Coeficientes para função da razão dos calores específicos para misturas não queimadas e queimadas.	89
Tabela 5 – Propriedades gerais da GUI do Painel de Controle.	90
Tabela 6 – Propriedades dos painéis/grupos de objetos.	90

LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

A_{i_g}	Área do grupo i_g
A_n	Área não agrupada
AC	Complexidade de alinhamento
$AHRR$	Taxa de liberação de calor aparente
$AGPV$	Alternância do gráfico PxV
B	Diâmetro do cilindro
BD	Banco de dados de experimentos
$BDPC$	Banco de dados do Painel de Controle
$BDRE$	Banco de dados do Repositório de Experimentos
BQn	Equilíbrio do número de objetos
$BQnq_1$	Número de objetos no quadrante q_1
$BQnq_2$	Número de objetos no quadrante q_2
BQs	Equilíbrio do tamanho dos objetos
$BQsq_1$	Soma do tamanho dos objetos no quadrante q_1
$BQsq_2$	Soma do tamanho dos objetos no quadrante q_2
C_{tdx}	Número de tamanhos diferentes do tipo x
C_n	Número de aquisições
C_{nc}	Número de ciclos pré-armazenados
$CDAQ$	Configuração do DAQ
CE	Cadastro do experimento
CI	Ignição por compressão
CO	Monóxido de carbono
CO_2	Dióxido de carbono
CP	Combustion Parameters
CoV	Coefficiente de variação
CoV_{IMEP}	Coefficiente de variação da pressão média efetiva indicada líquida
$CoV_{P_{max}}$	Coefficiente de variação da máxima pressão do cilindro
DAQ	Sistema de aquisição de dados
DC	Complexidade de densidade
$dp/d\theta$	Derivada da pressão do cilindro em relação ao ângulo de manivela/virabrequim
$dV/d\theta$	Derivada do volume instantâneo do cilindro em relação ao ângulo de manivela/virabrequim
$d\theta$	Diferencial do ângulo de manivela/virabrequim
f	Frequência do pulso medida
EGR	Recirculação de gases de exaustão
G	Ganho do sensor piezoelétrico de pressão
GA	Alinhamento do grupo
GD	Densidade de objetos não agrupados na tela
GEE	Gases do efeito estufa
$GPMOT$	Grupo de Pesquisa em Motores, Combustíveis e Emissões
GT	Complexidade de agrupamento
GUI	Interface gráfica do usuário
HC	Hidrocarbonetos não queimados
$HCCI$	Ignição por compressão de carga homogênea
HCI	Interação humano-computador

H_p	Número de pontos de alinhamento horizontal no grupo
H_{P_n}	Número de pontos de alinhamento horizontal não agrupados
<i>ICE</i>	Internal combustion engine
<i>IDE</i>	Ambiente de desenvolvimento integrado
<i>IMEP</i>	Pressão média efetiva indicada
$IMEP_g$	Pressão média efetiva indicada bruta
$IMEP_n$	Pressão média efetiva indicada líquida
i_g	Grupo de objetos
i_n	Objeto não agrupado
i_o	Objeto
<i>K</i>	Número de objetos no grupo
<i>KI</i>	Intensidade de detonação
K_n	Número de objetos não agrupados na tela
<i>L</i>	Curso do pistão
LD_{i_g}	Densidade do grupo i_g
<i>LC</i>	Complexidade de <i>layout</i>
<i>l</i>	Comprimento da biela
<i>M</i>	Número total de objetos em todos os objetos
<i>MCI</i>	Motor de combustão interna
<i>MEP</i>	Pressão média efetiva
<i>MFB</i>	Fração de massa queimada
<i>m</i>	Número de grupos na tela
<i>N</i>	Frequência de rotação do motor
<i>NA</i>	Não agrupado
<i>NO</i>	Monóxido de carbono
<i>NO₂</i>	Dióxido de carbono
<i>NO_x</i>	Óxidos de nitrogênio
n_c	Tamanho do pacote de dados a ser armazenado
n_p	Número de pulsos por revolução do canal de frequência
n_{pr}	Número de pulsos de disparo por revolução do motor
n_r	Número de voltas da manivela/virabrequim por curso de expansão
n_{tt}	Número de objetos na tela
<i>OB</i>	Operation Buttons
<i>OC</i>	Operation Conditions
<i>OP</i>	Operation Parameters
<i>P</i>	Potência
P_{max}	Pressão máxima do cilindro
<i>P&D</i>	Pesquisa e desenvolvimento
<i>PC</i>	Computador pessoal
<i>PD</i>	Pacote de dados
<i>PM</i>	Ponto de medida
<i>PMEP</i>	Pressão média efetiva de bombeamento
<i>PMI</i>	Ponto morto inferior
<i>PMS</i>	Ponto morto superior
<i>p</i>	Pressão do cilindro
p_f	Pressão do cilindro filtrada
p'_f	Pressão do cilindro suavizada
p_r	Ruído de combustão

Q_k	Comparação de quadrantes
q_1	Primeiro quadrante de referência
q_2	Segundo quadrante de referência
R_{max}	Máxima taxa de subida de pressão do cilindro
$R\&D$	Research and development
r_c	Razão de compressão
S_N	Número de amostras de um ciclo inteiro
S_{i_o}	Área do objeto i_o
SA	Alinhamento da tela
SC	Complexidade de tamanho total
SC_x	Complexidade de tamanhos de objetos do tipo x
SDM	Sentido de melhoria
SI	Ignição por centelha
SPM	Ponto de medida do software
SO	Sistema operacional
SO_2	Dióxido de enxofre
SO_3	Trióxido de enxofre
T	Temperatura do gás
TA	Temperatura de admissão
TAC	Complexidade de alinhamento total
TBC	Complexidade total de balanço
TE	Temperatura de exaustão
TO	Temperatura do óleo
U	Sinal de pressão do cilindro medido em tensão
U_s	Usabilidade do <i>layout</i>
$UFMS$	Universidade Federal de Santa Maria
V	Volume instantâneo do cilindro
V_c	Volume morto ou mínimo volume do cilindro
V_{cn}	Contagem de ciclos adquiridos
V_d	Volume deslocado pelo pistão entre o PMS e PMI
V_p	Número de pontos de alinhamento vertical do grupo
V_{pn}	Número de pontos de alinhamento vertical não agrupados
V_t	Volume total do cilindro
\bar{X}	Média do pacote de dados
X_c	Centro na direção X
\bar{X}_{IMEP}	Média da pressão média efetiva indicada líquida do pacote de dados
\bar{X}_{Pmax}	Média da máxima pressão do cilindro pacote da dados
$X1$	Coordenada X do ponto 1
$X2$	Coordenada X do ponto 2
x	Tipo de objeto
Y_c	Centro na direção Y
$Y1$	Coordenada Y do ponto 1
$Y2$	Coordenada Y do ponto 2
W	Trabalho
$W_{c,i}$	Trabalho líquido
$W_{c,ig}$	Trabalho bruto
W_p	Trabalho de bombeamento
$w_{a,1}$	Razão do número de objetos total agrupados e o número total de objetos na tela

$w_{a,2}$	Razão do número de objetos total não agrupados e o número total de objetos na tela
$w_{a,g}$	Razão entre a área total ocupada pelos grupos pela área total da tela
w_{an}	Razão entre a área total não agrupada pela área total da tela
β_x	Número de objetos do tipo x
γ	Razão entre os calores específicos
γ_b	Razão entre os calores específicos da massa queimada
γ_{pegg}	Coefficiente politrópico de referenciamento da pressão
γ_u	Razão entre os calores específicos da massa não queimada
$\Delta\theta$	Diferença angular
$\Delta\theta_b$	Crescimento turbulento de chama
$\Delta\theta_d$	Crescimento precoce de chama
$\delta\theta$	Resolução angular
ϵ	Fração do número de objetos no grupo pelo total de objetos agrupados
ζ	Número total de tipos de objetos
θ	Ângulo de manivela/virabrequim
θ_1	Primeiro ângulo de referência do referenciamento da pressão
$\theta_{10\%}$	Ângulo de 10% de massa queimada
θ_{1k}	Ângulo inicial de avaliação da inclinação da curva do diagrama $\log p - \log V$
θ_2	Segundo ângulo de referência do referenciamento da pressão
θ_{2k}	Ângulo final de avaliação da inclinação da curva do diagrama $\log p - \log V$
$\theta_{50\%}$	Fase da combustão
$\theta_{90\%}$	Ângulo de 90% de massa queimada
$\theta_{P_{max}}$	Ângulo de máxima pressão do cilindro
$\theta_{R_{max}}$	Ângulo de máxima taxa de subida de pressão do cilindro
θ_{SOC}	Início da combustão
$\theta_{U_{max}}$	Ângulo de máxima tensão
θ_f	Ângulo final de avaliação da intensidade de detonação
θ_{fx}	Ângulo de término do cálculo da fração de massa queimada
θ_i	Ângulo inicial de avaliação da intensidade de detonação
θ_{ix}	Ângulo de início do cálculo da fração de massa queimada
θ_{offset}	Ângulo de deslocamento do PMS
θ_{raw}	Ângulo de manivela/virabrequim ideal
λ	Fator de excesso de ar
σ	Desvio padrão do pacote de dados
σ_{IMEP}	Desvio padrão da pressão média efetiva indicada líquida do pacote de dados
$\sigma_{P_{max}}$	Desvio padrão da máxima pressão do cilindro do pacote de dados
ψ_x	Número de objetos do tipo x

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	CENÁRIO GLOBAL	16
1.2	PROBLEMÁTICA	20
1.3	OBJETIVO	21
1.3.1	Objetivo Geral	21
1.3.2	Objetivos Específicos	21
1.4	JUSTIFICATIVA	22
1.5	ORGANIZAÇÃO DA MONOGRAFIA	22
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	23
2.1	MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA.....	23
2.2	MEDIÇÃO DA PRESSÃO DO CILINDRO.....	30
2.3	PROCESSAMENTO DO SINAL DE PRESSÃO DO CILINDRO	31
2.3.1	Referenciamento do Ciclo	31
2.3.2	Referenciamento da Pressão	32
2.3.3	Filtragem e Suavização	33
2.3.4	Mediação Cíclica	33
3	METODOLOGIA	34
3.1	MÉTODO DE DESENVOLVIMENTO.....	34
3.2	APARATO EXPERIMENTAL.....	38
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	41
4.1	FASE DE REQUISITOS.....	41
4.2	FASE DE PROJETO DE ARQUITETURAL	44
4.3	FASE DE PROJETO DETALHADO	48
4.3.1	Painel de Controle	48
4.3.2	Repositório de Experimentos	57
4.3.3	Cadastro de Experimentos	58
4.3.4	Configuração do DAQ	59
4.4	FASE DE CODIFICAÇÃO E TESTE DE UNIDADES	60
4.4.1	Painel de Controle	60
4.4.2	Repositório de Experimentos	65
4.4.3	Cadastro de Experimentos	67
4.4.4	Configuração do DAQ	67
4.5	FASE DE TESTE DE INTEGRAÇÃO.....	69
4.6	FASE DE TESTE DE SISTEMA.....	69
4.7	REQUISITOS MÍNIMOS DO SISTEMA	71
4.8	SÍNTESE.....	74
5	CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS	76
5.1	CONCLUSÃO	76
5.2	TRABALHOS FUTUROS.....	78
	REFERÊNCIAS	79
	ANEXO 1 – MODELO DE COMPLEXIDADE DE LAYOUT	84
	ANEXO 2 – MODELO DE RAZÃO DOS CALORES ESPECÍFICOS	89
	ANEXO 3 – PROPRIEDADES DA GUI DO PAINEL DE CONTROLE	90

1 INTRODUÇÃO

Nessa seção são apresentados o cenário em que o problema foi identificado, o problema identificado, o objetivo desse trabalho, a justificativa para realização desse trabalho e um resumo de como está organizada essa monografia. Na subseção Cenário, é apresentado o contexto global problemático encontrado. Na subseção Proble, é evidenciado o problema identificado no cenário problemático. Na subseção Objetivo, é apresentado o objeto geral dessa monografia e os objetivos específicos que são atendidos para realização desse trabalho. Na subseção Justificativa, é apresentada o motivo pelo qual a realização desse trabalho contribui para a resolução do problema. Por fim, a subseção Organização da Monografia, apresenta brevemente como essa monografia está estruturada.

1.1 CENÁRIO GLOBAL

A demanda energética do setor de transporte de cargas e pessoas é quase que totalmente suprida (>99,9%) pela queima de combustíveis fósseis em motores de combustão interna (MCIs) (KALGHATGI, 2018). A queima desses combustíveis ocorre através de um processo gradativo de oxidação com liberação de calor com ou sem a emissão de luz, denominado como combustão (TURNNS, 2001). Nos MCIs, esse processo produz gases queimados de alta pressão e temperatura que expandem dentro do cilindro transferindo trabalho para o pistão (HEYWOOD, 2018). Esses gases produzidos são compostos por poluentes, tais como: hidrocarbonetos não queimados (HC) ou parcialmente queimados, óxidos de nitrogênio (NO e NO₂), monóxido de carbono (CO), óxidos de enxofre (SO₂ e SO₃) e material particulado das mais variadas formas. Esses poluentes causam problemas de saúde, nevoeiros químicos (*smog*), chuvas ácidas e a redução da camada de ozônio terrestre (TURNNS, 2001). Além disso, a queima ainda tem como produto primário o dióxido de carbono (CO₂), um dos gases do efeito estufa (GEE) (COLLIN R. FERGUSON, 2016) responsáveis pelo aumento da temperatura média da superfície terrestre (DUNNE; JACKSON; HARTE, 2013).

No sentido de atenuar os impactos das mudanças climáticas causadas pelo aumento da temperatura, os governos nacionais firmaram na ratificação do Acordo de Paris em 2015, o compromisso de reduzir as emissões de GEE mediante a planos nacionais regulamentares (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2016). Desta forma,

essas exigências cada vez mais rigorosas acerca das emissões e eficiência, introduz novos desafios para o projeto e o controle dos motores modernos (THOR; ANDERSSON; MCKELVEY, 2009).

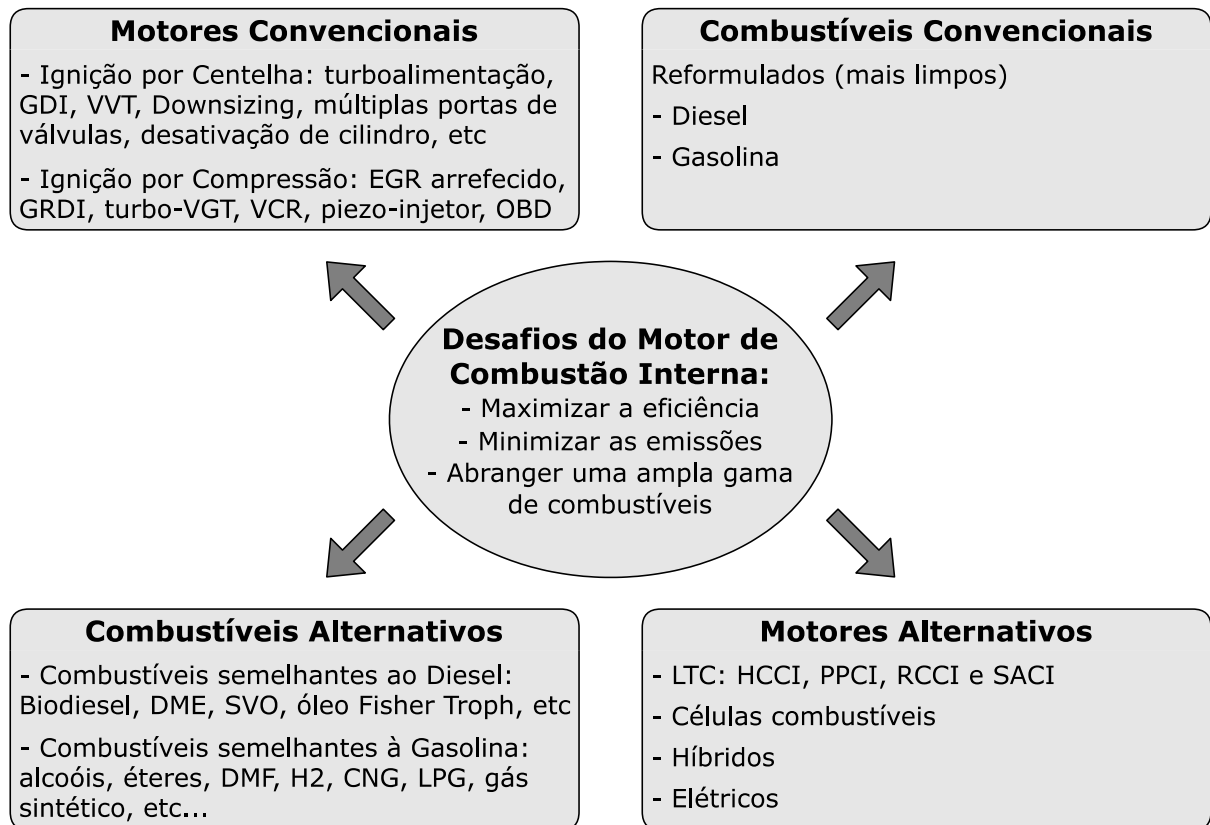
Por esse motivo, nos últimos anos, o MCI tem estado sob foco. As regulamentações cada vez mais restritivas acerca das emissões de poluentes, a necessidade de uma significativa redução nas emissões de CO₂ e a concorrência com concepções alternativas de motores, têm iniciado a discussão a respeito do futuro dos MCIs (CHIODI, 2011). Nesse sentido, o setor de transporte está se adaptando às tecnologias de eletrificação dos veículos como forma de combater a poluição do ar e os impactos associados às mudanças climáticas (HERNANDEZ et al., 2019). Contudo, os custos ambientais, econômicos e sociais associados à rápida adaptação a essas tecnologias, fazem com que os MCIs sejam a fonte motriz mais viável do setor de transporte ao longo das próximas décadas (KALGHATGI, 2018).

Diante a isso, há uma série de desafios técnicos que devem ser superados para reduzir os níveis de emissões de poluentes e de CO₂ para melhorar a qualidade do ar local e diminuir o risco de aquecimento global (MAURYA, 2018). Para enfrentar esses desafios técnicos, avanços tecnológicos são necessários para maximizar a eficiência do motor, minimizar as emissões de gases de exaustão e otimizar os sistemas para operar com uma ampla variedade de combustíveis (REITZ, 2015). A Figura 1 da página 18 apresenta uma visão geral das principais tecnologias em desenvolvimento para enfrentar esses desafios técnicos (MAURYA, 2018).

No desenvolvimento de motores, o processo de transformação de ideias em um produto é muito complexo e custoso. Esse processo tem de considerar as seguintes etapas: estimativa do potencial técnico e econômico da ideia, construção do protótipo, teste e aprimoramento do protótipo, construção do motor final e teste e aprimoramento do motor final (CHIODI, 2011). Para isso, diversas ferramentas podem ser utilizadas. Essas ferramentas podem ser divididas em ferramentas experimentais (teste em bancada e investigação laboratorial) e ferramentas teóricas (estimativas e simulações numéricas) (CHIODI, 2011). O primeiro passo de uma simulação numérica consiste na construção de um modelo que descreva o processo. Antes de ser aplicado, esse modelo deve ser validado com base em dados medidos experimentalmente para garantir que o modelo descreva adequadamente o processo

(MERKER et al., 2006). Sendo assim, um desenvolvimento completamente virtual, sem medições em bancada de teste, não existe e nunca deve existir (CHIODI, 2011).

Figura 1 - Visão geral das principais tecnologias em desenvolvimento para enfrentar os desafios técnicos para os futuros motores automotivos.



Fonte: Adaptado de (MAURYA, 2018).

O processo de combustão é um componente importante dentro do ciclo de operação dos MCIs. Para que o motor opere regularmente com segurança, é necessário que o processo de combustão seja robusto. Além disso, os processos pelo qual as emissões são formadas dentro do cilindro são intrinsecamente ligados com a maneira que o processo de combustão decorre (HEYWOOD, 2018). O diagnóstico experimental da combustão é utilizado para investigar tecnologias e validar modelos teóricos, além de auxiliar na otimização e controle do processo em tempo real (MAURYA, 2019). Esse diagnóstico é frequentemente realizado através do processamento digital do sinal de pressão do cilindro, obtido através de um sensor instalado dentro da câmara de combustão do motor (MAURYA; PAL; AGARWAL, 2013).

A representação da pressão do cilindro em função do tempo ou em função da posição do virabrequim é chamada de indicação de pressão (BASSHUYSEN; SCHÄFER, 2004). A indicação é a ferramenta de desenvolvimento mais rápida e com a maior qualidade para otimização de motores a combustão. Nenhuma outra técnica de medição entrega a mesma riqueza de informações sobre os processos internos do motor. Além disso, quando usado competentemente, é a técnica de medição mais segura e é, portanto, aplicável como um método de medição padrão nas bancadas de testes de desenvolvimento (MERKER; SCHWARZ; TEICHMANN, 2012).

Através da indicação de pressão, são calculados diversos valores uteis para a realização do diagnóstico da combustão, tal como a taxa de liberação de calor aparente (AHRR) e a fração de massa queimada (MFB), os quais são utilizados no desenvolvimento de novos sistemas de combustão, na análise da queima de combustíveis alternativos, na validação de modelos matemáticos para simulação do motor, na investigação dos efeitos de isolamento da câmara de combustão e para o estudo de novas estratégias de injeção (BUENO; VELÁSQUEZ; MILANEZ, 2012).

A indicação de pressão não é aplicada apenas para o diagnóstico experimental da combustão e para a validação de modelos matemáticos, ela também é aplicada em diversas outras áreas de desenvolvimento do motor, tal como pode ser observado na Figura 2 da página 19.

Figura 2 – Áreas de aplicação da indicação de pressão.



Fonte: Adaptado de (MERKER; SCHWARZ; TEICHMANN, 2012)

Os sistemas de indicação de pressão modernos são capazes de calcular diversas métricas de combustão em tempo real durante o experimento na bancada de teste. Isso permite realizar diversas análises e correções na configuração do motor em tempo real durante o experimento (MERKER; SCHWARZ; TEICHMANN, 2012), deste modo, acelerando o desenvolvimento do motor. Algumas atividades que podem ser feitas durante o experimento são (MERKER; SCHWARZ; TEICHMANN, 2012):

- Análise de falhas na combustão (falha de ignição e pré-ignição);
- Otimização automática do mapa característico do motor;
- Detecção de detonação;
- Ajuste da recirculação de gases de exaustão (EGR);
- Otimização do ruído de combustão.

Dadas as grandes metas definidas para os motores de combustão interna, a análise termodinâmica da combustão via medição de pressão do cilindro é sempre um elemento fixo na sequência de desenvolvimento (BASSHUYSSEN; SCHÄFER, 2004). Atualmente, diversos sistemas estão disponíveis comercialmente para indicação de pressão, entretanto, esses sistemas possuem elevado custo aquisitivo, além de possuírem flexibilidade limitada. Para ensaios específicos em laboratório com instrumentação limitada, sistemas flexíveis e de baixo custo podem ser desenvolvidos (MAURYA, 2019) e são mais desejados.

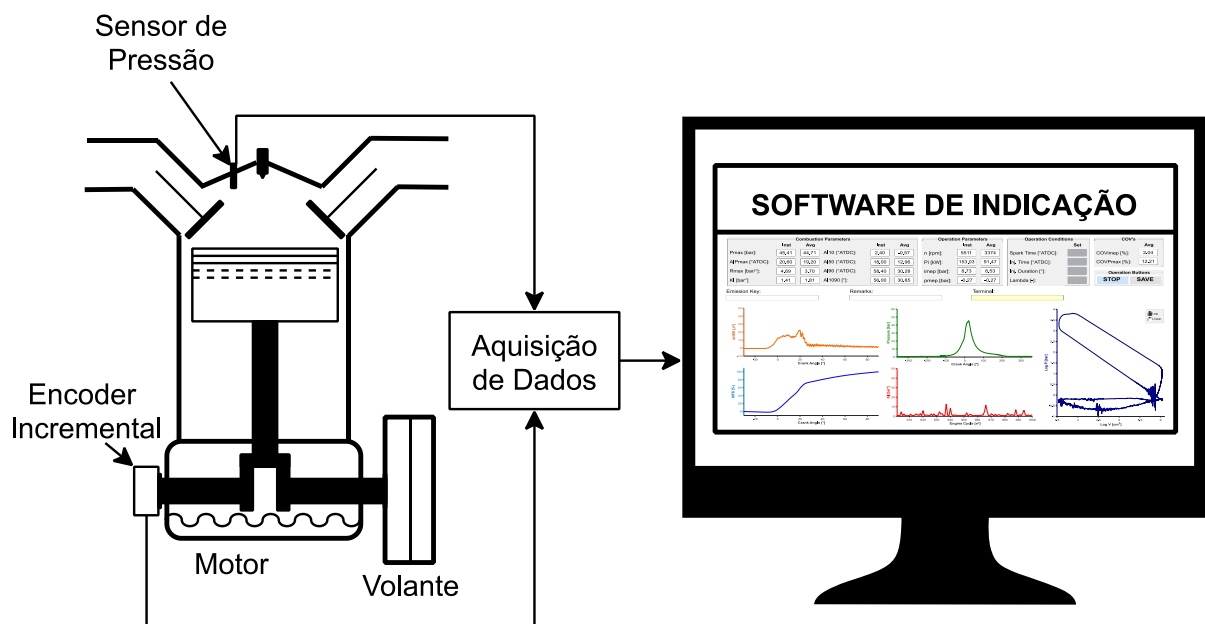
A Figura 3 da página 21 apresenta um sistema típico de indicação aplicado a cadeia essencial de medição da pressão do cilindro. Nesse sistema, a variação da pressão do cilindro é medida através de um transdutor piezoelétrico de pressão, enquanto a variação da posição do virabrequim é registrada por um decodificador incremental angular (*encoder incremental*). Essas medições são adquiridas, processadas e exibidas em um software de indicação para o monitoramento e aquisição de dados do ensaio.

1.2 PROBLEMÁTICA

No que tange o desenvolvimento de tecnologias para aprimorar os MCIs, de modo a atender as futuras necessidades ambientais, sociais e econômicas, o uso da indicação de pressão para o diagnóstico da combustão é imprescindível, em razão da sua grande riqueza de informações e sua vasta gama de aplicabilidades. Nesse sentido, é inerente a necessidade de um software de indicação, tanto para a aquisição

de dados, quanto para o monitoramento do ensaio. Entretanto, os softwares disponíveis no mercado demandam de um sistema complexo, composto por uma grande quantidade de sensores e instrumentos para um pleno funcionamento, o que nem sempre é possível em aparatos experimentais de baixo custo e/ou com limitada intervenção no MCI.

Figura 3 – Sistema típico de indicação aplicado a cadeia essencial de medição da pressão do cilindro



1.3 OBJETIVO

1.3.1 Objetivo Geral

Desenvolver um software de indicação para MCIs aplicável a sistemas flexíveis de instrumentação limitada e de baixo custo que permita o monitoramento e análise da combustão durante o ensaio.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Elencar os desejos essenciais do usuário frente a literatura;
- Transformar os desejos essenciais do usuário em requisitos de software;

- Estruturar a arquitetura do software de forma apropriada a atender os requisitos de software;
- Projetar as unidades dos componentes da arquitetura estruturada;
- Implementar o projeto em software;
- Verificar a estrutura e o desempenho das implementações frente o projeto e as especificações;
- Validar o desempenho do software desenvolvido em atender os desejos essenciais do usuário em um ensaio experimental;
- Levantar os requisitos mínimos do sistema para a aplicação do software desenvolvido.

1.4 JUSTIFICATIVA

O elevado custo operacional associado ao sistema complexo exigido, inflexibilidade e incompatibilidade dos softwares de indicação comerciais, são fatores que podem inviabilizar a execução de projetos de pesquisa e desenvolvimento (P&D) em MCIs em pequenas empresas, centros de pesquisa, oficinas, laboratórios e universidades. Diante disso, a presente monografia busca desenvolver uma ferramenta de auxílio à P&D de tecnologias aplicadas a MCIs em sistemas simples, com instrumentação limitada e variada, e desta forma, contribuir no desenvolvimento de tecnologias aplicadas à MCIs.

1.5 ORGANIZAÇÃO DA MONOGRAFIA

A presente monografia está organizada em 5 grandes seções. A seção Introdução, apresenta o que é essa monografia e a justificativa de sua realização. A seção Fundamentação Teórica, revisa a base teórica empregada no desenvolvimento do software, abordando desde o MCI até as particularidades da aquisição e processamento do sinal de pressão do cilindro. A seção Metodologia, apresenta o método de desenvolvimento empregado e os aparatos experimentais utilizados. A seção Resultados e Discussão, apresenta o produto e o processo de desenvolvimento de uma forma analítica e objetiva. A seção Conclusão e Trabalhos Futuros, avalia todo o processo de construção do produto dessa monografia e propõe frentes de desenvolvimento a partir desse trabalho. Fundamentação Teórica

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nessa seção é apresentada a base teórica empregada no desenvolvimento do software. Na subseção Motores de Combustão Interna são abordados os fundamentos básicos do funcionamento do motor, as principais representações gráficas utilizadas em ensaios em bancada de teste, bem como os indicadores de desempenho do motor essenciais para o monitoramento do experimento. Já na subseção Medição da Pressão do Cilindro, é apresentado o sistema de aquisição de dados essencial para indicação de pressão do motor. Por fim, na subseção Processamento do Sinal de Pressão Do Cilindro, são abordadas as quatro etapas essenciais de processamento do sinal de pressão do cilindro para indicação de pressão.

2.1 MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA

Os MCI usam a energia liberada do combustível pela combustão dentro do motor para produzir potência mecânica de eixo. O movimento linear do pistão é convertido em movimento rotacional do virabrequim pelo sistema biela-manivela. A rotação da manivela produz um movimento cíclico do pistão, o qual se desloca entre dois limites: ponto morto superior (PMS) e ponto morto inferior (PMI); onde o volume do cilindro é mínimo (V_c) e máximo (V_t), respectivamente. A grande maioria dos MCIs operam em ciclos de quatro tempos, que compreendem em quatro cursos do pistão: admissão, compressão, expansão e exaustão, correspondentes a duas voltas do virabrequim. A combustão ocorre de formas diferentes de acordo com o sistema de ignição, podendo ocorrer por centelha (SI) ou por compressão (CI) (HEYWOOD, 2018). Os gases oriundos da combustão possuem em sua composição significativas fontes de poluição do ar, além do CO_2 , um dos grande responsável pelo efeito estufa (DUNNE; JACKSON; HARTE, 2013).

A medição e a análise da pressão do cilindro é uma prática fundamental usada globalmente para pesquisa e desenvolvimento (P&D) de motores. Desde a invenção dos MCIs, a medição da pressão do cilindro tem sido a principal ferramenta de diagnóstico para experimentadores. A medição da pressão do cilindro é de grande importância para fins de calibração, monitoramento, diagnóstico, validação de modelos numéricos e controle de malha fechada. Engenheiros de calibração usam a

análise da combustão para melhorar emissões, consumo de combustível e a calibração de desempenho de motores (MAURYA, 2019).

A medição e a análise da pressão do cilindro baseado no ângulo da manivela, também chamada de indicação de pressão (BASSHUYSEN; SCHÄFER, 2004), pode ser usada para determinar variáveis como as cargas do pistão e do virabrequim, torque produzido pela combustão, torque produzido pela troca de gases, fase da combustão, tempo necessário para a chama se desenvolver e propagar, presença e a magnitude da detonação, variabilidade ciclo a ciclo e cilindro a cilindro e etc. (ATKINS, 2009). Além disso, a análise da combustão via pressão do cilindro pode ser empregada para diversos objetivos de desenvolvimento, tal como:

- Estimativa de geometrias para portas e coletores de admissão e exaustão;
- Quantificação da compensação (*trade-off*) da razão de compressão;
- Otimização da geometria da câmara de combustão;
- Seleção do tempo de sobreposição de válvulas e sua duração;
- Otimização do tempo de injeção de combustível e sua duração;
- Otimização da relação potência/taxa de subida de pressão/ NO_x ;
- Mapeamento automatizado;
- Investigação da resposta transiente;
- Medição do atrito mecânico;
- Otimização de calibração.

No sentido de descrever o processo de combustão de um MCI, é necessário saber, não apenas a pressão e o volume, mas também a temperatura do gás a qualquer instante (MATSUDA; MITSUNOBU, 1972). Entretanto, enquanto os métodos de medição instantânea da pressão e do volume foram bem desenvolvidos, o desenvolvimento de métodos para medição independente e direta da temperatura instantânea do gás teve grandes desafios (HERSHEY; PATON, 1933). O principal desafio enfrentado foi a criação de um instrumento que realizasse medições sem alterar o que estava sendo medido, de forma precisa e com o mínimo atraso no tempo de resposta (MARR et al., 2010). Diferentemente da pressão, que depende apenas da existência de um equilíbrio de pressão para realizar medições precisas, a temperatura depende de um instantâneo equilíbrio térmico (HERSHEY; PATON, 1933). Enquanto o equilíbrio de pressão é praticamente existente a qualquer instante

(HERSHEY; PATON, 1933), o equilíbrio térmico instantâneo é impraticável devido a distribuição não uniforme de temperatura causada pela propagação da chama e pelo efeito Hopkinson (MATSUDA; MITSUNOBU, 1972). Desta forma, para se obter diretamente valores efetivos de temperatura, o instrumento deve englobar toda a região do cilindro e também deve possuir capacidade térmica insignificante em comparação com o fluido de trabalho (HERSHEY; PATON, 1933). Por essa razão, métodos de diagnóstico óptico estão sendo aplicados para medições de temperatura do fluido (ABRAM; FOND; BEYRAU, 2018). Entretanto, métodos de visualização dependem sempre de iluminação, a qual deve estar disponível junto com um acesso óptico à câmara de combustão para criação das imagens, o que usualmente é dado por janelas transparentes. Motores como esses podem ser operados em condições próximas da realidade, mas dentro de restrições de carga e velocidade para que seja possível uma apropriada aplicação de métodos de visualização (BASSHUYSEN; SCHÄFER, 2004). Como a pressão pode ser medida e a densidade da carga pode ser facilmente determinada pelo volume e a quantidade de massa presa no cilindro, a temperatura média do gás pode ser facilmente estimada em função do ângulo de manivela (MAURYA, 2019). Assim, evitando custos relacionados à instrumentação e produção de um motor protótipo para aplicação de diagnósticos ópticos.

A temperatura do gás de combustão desempenha um importante papel na formação de óxidos de nitrogênio (NO_x) e suas subseqüentes emissões. A formação de NO_x é muito sensível ao pico de temperatura encontrado durante a combustão. Em temperaturas acima de 1800 K, a taxa de formação de NO_x cresce rapidamente. A máxima temperatura na câmara de combustão também afeta a eficiência de combustão. Em baixas temperaturas, a eficiência de combustão decresce, o que acarreta em maiores emissões de hidrocarbonetos não queimados (HC) (MAURYA, 2019). Desta forma, a estimativa da temperatura média do gás via indicação de pressão é uma poderosa ferramenta que pode ser aplicada para levar conclusões a respeito de emissões durante o experimento. Além disso, algoritmos de redes neurais (TRAVER; ATKINSON; ATKINSON, 1999) e aproximações baseadas em regressão (BENZ; ONDER, 2010) podem ser aplicados à indicação de pressão para prever as emissões do motor e a qualidade da combustão.

O desempenho de um MCI é dado pela efetividade do motor produzir trabalho com relação a energia liberada pela combustão (MAURYA, 2019). A partir da indicação de pressão, vários parâmetros de desempenho, combustão e operação podem ser

estimados. Além disso, representações gráficas são empregadas para avaliação visual do experimento, identificação de eventos e fontes de incerteza de medição. O Quadro 1 lista as três principais representações gráficas oriundas da indicação de pressão e seus respectivos aspectos de análise.

Quadro 1 - Usuais representações gráficas dos dados de pressão medidos.

Gráfico	Aspectos de Análise
$p - \theta$	Identificação de eventos de válvula, ignição, injeção etc.
$p - V$	Visualização dos trabalhos realizados
$\log p - \log V$	Avaliação dos coeficientes politrópicos (coeficiente angular)
	Visualização ampliada dos trabalhos realizados
	Identificação de fontes de incerteza de medição

Fonte: Adaptado de (MAURYA, 2019).

p : Pressão do cilindro
 V : Volume instantâneo do cilindro
 θ : Ângulo da manivela/virabrequim

O volume instantâneo do cilindro (V) pode ser calculado através da relação (HEYWOOD, 2018):

$$V(\theta) = V_d \left(\frac{1}{r_c - 1} + \frac{1}{2} \left[\frac{2l}{L} + 1 - \cos \theta - \left(\left(\frac{2l}{L} \right)^2 - \sin^2 \theta \right)^{\frac{1}{2}} \right] \right) \quad (1)$$

L : Curso do pistão
 r_c : Razão de compressão
 V_d : Volume deslocado pelo pistão entre o PMS e o PMI
 θ : Ângulo de manivela/virabrequim

O volume deslocado entre o PMS e o PMI (V_d) pode ser estimado, considerando que a coroa do pistão seja plana, através da relação:

$$V_d = \frac{\pi}{4} B^2 L \quad (2)$$

B : Diâmetro do cilindro
 L : Curso do pistão

O trabalho W , a potência P e a pressão média efetiva (MEP) são as principais medidas de carga impostas ao motor. Em motores operando em ciclos em quatro tempos, existem três definições distintas de trabalho:

- 1) Trabalho bruto ($W_{c,ig}$): realizado ao longo do loop de alta pressão;

- 2) Trabalho líquido ($W_{c,i}$): realizado ao longo do ciclo inteiro;
- 3) Trabalho de bombeamento (W_p): realizado ao longo do loop de baixa pressão.

O trabalho e potência são calculadas através relações:

$$W = \oint p dV \quad (3)$$

$$P = \frac{W \cdot N}{n_r} \quad (4)$$

N : Frequência de rotação do motor
 n_r : Número de voltas da manivela por curso de expansão
 p : Pressão do cilindro
 V : Volume instantâneo do cilindro

Diferentemente do trabalho e da potência, a pressão média efetiva possibilita a comparação de motores de diferentes tamanhos (HEYWOOD, 2018). Ela é definida como:

$$MEP = \frac{W}{V_d} \quad (5)$$

V_d : Volume deslocado pelo pistão entre o PMS e o PMI
 W : Trabalho

Assim como o trabalho, em motores operando em ciclo em quatro tempos, a pressão média efetiva divide-se basicamente em (HEYWOOD, 2018):

- 1) Pressão média efetiva indicada bruta ($IMEPg$): correspondente ao trabalho bruto ($W_{c,ig}$);
- 2) Pressão média efetiva indicada líquida ($IMEPn$): correspondente ao trabalho líquido ($W_{c,i}$);
- 3) Pressão média efetiva de bombeamento ($PMEP$): correspondente ao trabalho de bombeamento (W_p).

A curva de taxa de liberação de calor aparente (AHRR) do motor pode ser calculada por meio da seguinte relação (LARS; LARS, 2014):

$$AHRR(\theta) = \frac{1}{\gamma - 1} V(\theta) \frac{dp(\theta)}{d\theta} + \frac{\gamma}{\gamma - 1} p(\theta) \frac{dV(\theta)}{d\theta} \quad (6)$$

$dp/d\theta$: Derivada da pressão do cilindro em relação ao ângulo de manivela/virabrequim

$dV/d\theta$: Derivada do volume instantâneo do cilindro em relação ao ângulo de manivela/virabrequim
 γ : Razão entre os calores específicos
 θ : Ângulo da manivela/virabrequim

O uso da razão entre os calores específicos (γ) para todos os ciclos, é a principal fonte de incerteza no cálculo da AHRR (BRUNT; RAI; EMTAGE, 1998). Nesse sentido, pode-se aproximar γ , ciclo a ciclo, através da inclinação das curvas de compressão e expansão no diagrama $\log p - \log V$, dada por (BRUNT; PLATTS, 1999):

$$\gamma = \frac{\log p(\theta_{1k}) - \log p(\theta_{2k})}{\log V(\theta_{2k}) - \log V(\theta_{1k})} \quad (7)$$

p : Pressão do cilindro
 V : Volume instantâneo do cilindro
 θ_{1k} : Ângulo inicial de avaliação da inclinação da curva do diagrama $\log p - \log V$
 θ_{2k} : Ângulo final de avaliação da inclinação da curva do diagrama $\log p - \log V$

A literatura (QUINTANA; CASTAÑO-MESA; BEDOYA, 2018) recomenda para combustíveis líquidos, ângulos de referência de -100° e -65° , ou seja, $\theta_{1k} = -100^\circ$ e $\theta_{2k} = -65^\circ$, antes do PMS para estimativa de γ na compressão.

A curva de fração de massa queimada (MFB) do motor pode ser calculada através da normalização da integral da taxa de liberação de calor aparente (AHRR) do motor, através da relação (MARTYR; PLINT, 2007):

$$MFB(\theta) = \frac{\int_{\theta_{0x}}^{\theta} AHRR(\theta) d\theta}{\max\{\int_{\theta_{0x}}^{\theta} AHRR(\theta) d\theta\}} \quad (8)$$

AHRR: Taxa de liberação de calor aparente
 $d\theta$: Diferencial do ângulo de manivela/virabrequim
 θ : Ângulo da manivela/virabrequim
 θ_{fx} : Ângulo de término do cálculo da fração de massa queimada
 θ_{ix} : Ângulo de início do cálculo da fração de massa queimada

O ângulo de início do cálculo da fração de massa queimada (θ_{0x}) pode ser qualquer ponto arbitrário entre o fechamento da válvula de admissão e o início da combustão (MARTYR; PLINT, 2007).

A forma da curva de fração de massa queimada do motor é frequentemente utilizada para caracterizar o processo de combustão (LARS; LARS, 2014). Para tal, são avaliadas a localização de pontos específicos da curva de fração de massa queimada. As características e a simbologia desses pontos específicos estão listadas no Quadro 2.

Quadro 2 - Caracterização do processo de combustão via curva de Fração de Massa Queimada.

Pontos específicos da MFB	Símbolo	Característica
θ de 0%	θ_{SOC}	Início da combustão
$\Delta\theta$ entre 0 ou 10%	$\Delta\theta_d$	Crescimento precoce de chama
θ de 50%	$\theta_{50\%}$	Fase da combustão
θ de 90%	$\theta_{90\%}$	Fim da combustão
$\Delta\theta$ entre 10% a 90%	$\Delta\theta_b$	Crescimento turbulento de chama

Fonte: Adaptado de (MARTYR; PLINT, 2007)

$\Delta\theta$: Diferença angular

θ : Ângulo de manivela/virabrequim

A estabilidade da combustão influencia diretamente na dirigibilidade, economia de combustível e nas emissões dos MCI (THOMAS et al., 2013). A avaliação da estabilidade normalmente é realizada pelo coeficiente de variação da pressão média efetiva indicada líquida (CoV_{IMEP}) (HEYWOOD, 2018). O coeficiente de variação é dado por:

$$CoV = 100\% \frac{\sigma}{\bar{X}} \quad (9)$$

\bar{X} : Média do pacote de dados

σ : Desvio padrão do pacote de dados

Valores de CoV_{IMEP} acima de 2% degradam significativamente a dirigibilidade veicular (MAURYA, 2019). Além do CoV_{IMEP} , a instabilidade da combustão também pode ser caracterizada pela variação cíclica do módulo e localização da pressão máxima e da máxima taxa de subida de pressão, P_{max} , $\theta_{P_{max}}$, R_{max} e $\theta_{R_{max}}$ respectivamente (HEYWOOD, 2018).

A detonação é um fenômeno chave que requer constante monitoramento durante o processo de desenvolvimento e calibração do MCI (MAURYA, 2019). A detecção do início da detonação e a determinação de sua intensidade são questões cruciais no desenvolvimento de motores e combustíveis (BRUNT; POND; BIUNDO, 1998). O início da detonação pode ser estimado pelo ângulo da máxima taxa de subida de pressão ($\theta_{R_{max}}$) em um ciclo em detonação. Para detectar a ocorrência de detonação, diversas métricas de intensidade de detonação são utilizadas. Em todas essas métricas, o traço de pressão é filtrado por um filtro passa-altas ou passa-banda

para eliminar o conteúdo de baixa frequência, oriundos da compressão dos gases e da propagação regular de chama (MAURYA, 2019).

A qualidade dos resultados oriundos da indicação de pressão depende da precisão de três fontes básicas de incertezas: referenciamento do ciclo (TAZEROUT; LE CORRE; ROUSSEAU, 1999), referenciamento da pressão (BRUNT; RAI; EMTAGE, 1998), e estimativa do coeficiente politrópico (BRUNT; POND, 1997). Sendo imprescindível, métodos adequados de precisão suficiente para cada procedimento. Por outro lado, a clara visualização dos resultados do experimento depende do conforto oriundo da disposição e do tamanho dos componentes da interface gráfica do usuário (GUI) de monitoramento (ALEMERIEN, 2014). Caso seja desconfortável, a experiência do usuário é frustrante, resultando na desaprovação do software pelo usuário (BESSIERE et al., 2003).

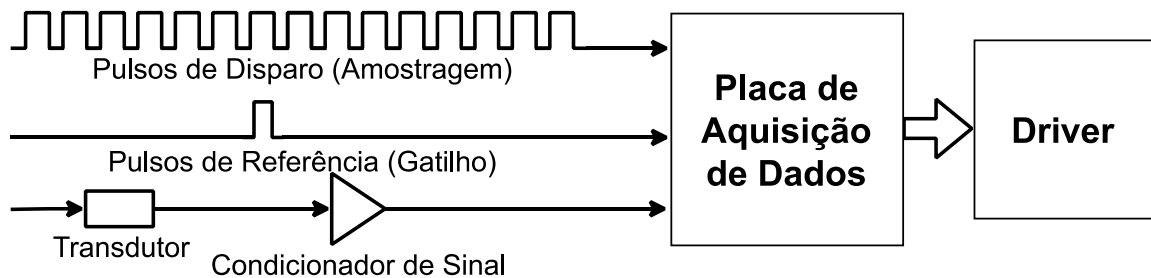
Nesse sentido, a complexidade de *layout* (LC) é uma medida de usabilidade do software de acordo com a percepção humana na visualização da interface gráfica do usuário (GUI). Ela contabiliza as complexidades específicas oriundas do balanço (disposição), do tamanho, da densidade, do alinhamento e do agrupamento dos componentes na GUI (ALEMERIEN, 2014; ALEMERIEN; MAGEL, 2014). Quanto maior é a complexidade visual da GUI, maior é a carga cognitiva exercida pelo usuário, e conseqüentemente, mais desconfortável é a experiência do usuário (STICKEL; EBNER; HOLZINGER, 2010).

2.2 MEDIÇÃO DA PRESSÃO DO CILINDRO

A medição da pressão do cilindro é realizada através de um sistema de aquisição de dados (DAQ) composto essencialmente por um transdutor piezoelétrico de pressão, um amplificador de sinal, um decodificador angular incremental (*encoder incremental*), uma placa de aquisição de dados e um computador. A cadeia principal de medição da pressão do cilindro está apresentada na Figura 4. Nela, ao passo que a pressão do cilindro varia, o transdutor piezoelétrico de pressão gera uma pequena corrente elétrica proporcional a essa variação. Então, esse sinal de corrente passa pelo amplificador de sinal, o qual, além de amplificar esse sinal de corrente, o filtra e o transforma em um sinal de tensão proporcional à variação de pressão. Como é conveniente avaliar o sinal de pressão do cilindro em relação ao ângulo da manivela, ao chegar na placa de aquisição de dados, esse sinal é amostrado ao passo em que

o ângulo de manivela varia. Para isso, é utilizado o decodificador angular incremental. O decodificador angular incremental gera pulsos à medida que o ângulo da manivela varia uma dada fração angular, chamada de resolução angular ($\delta\theta$). Esses pulsos são transmitidos até a placa de aquisição de dados, que adquire uma amostra do sinal de pressão do cilindro no exato instante que recebe esses pulsos. Entretanto, como o sinal de pressão do cilindro é amostrado com relação à variação angular da manivela ao passo que pulsos de amostragem são transmitidos pelo decodificador angular incremental, as amostras adquiridas não possuem nenhuma referência absoluta de ângulo de manivela. Para solucionar essa questão, o decodificador angular incremental possui um segundo canal de sinal, o qual transmite um pulso por volta completa da manivela para a placa de aquisição de dados de uma mesma posição angular da manivela. Esse pulso é utilizado pela placa de aquisição de dados como gatilho para dar início a amostragem do sinal de pressão do cilindro a partir de uma posição conhecida da manivela (MAURYA, 2019).

Figura 4 - Cadeia principal de medição da pressão do cilindro.



Fonte: Adaptado de (MAURYA, 2019).

2.3 PROCESSAMENTO DO SINAL DE PRESSÃO DO CILINDRO

Antes de extrair informações do sinal experimental de pressão, devem ser realizadas as seguintes 4 etapas de processamento (PAYRI et al., 2010): (1) referenciamento do ciclo, (2) referenciamento da pressão, (3) filtragem e suavização, e (4) mediação cíclica dos resultados (MAURYA; PAL; AGARWAL, 2013).

2.3.1 Referenciamento do Ciclo

O referenciamento do ciclo consiste na associação de cada amostra de pressão à sua real posição angular da manivela. Uma vez que a primeira amostra de pressão

do cilindro é adquirida na posição do pulso gatilho, basta associar a posição do pulso gatilho à primeira amostra que as demais são referenciadas corretamente. Entretanto, durante a instalação do decodificador angular incremental, nem sempre é possível medir o ângulo exato que é dado o pulso de gatilho. Portanto, alguns métodos e procedimentos precisam ser executados para medir e estabelecer corretamente a posição do pulso gatilho em relação a real posição angular do virabrequim. Esse procedimento é geralmente chamado de medição do ponto morto superior (PMS) (ROGERS, 2010). A medição do PMS pode ser realizada através de métodos diretos, com uso de instrumentos adicionais, ou por métodos indiretos, onde modelos termodinâmicos são aplicados aos dados de pressão do cilindro (BAŠKOVIČ et al., 2017). Nesses métodos, normalmente é determinado o ângulo de deslocamento do PMS (θ_{offset}), que corresponde ao ângulo formado a partir do PMS até a posição do pulso gatilho medido no sentido de giro do motor. Uma vez determinado o θ_{offset} , as posições de ângulo de manivela das amostras de pressão do cilindro podem ser deslocadas na interface do software de indicação para associar a sua real posição (ROGERS, 2010).

2.3.2 Referenciamento da Pressão

O referenciamento da pressão consiste na conversão da pressão relativa medida pelo sensor piezoelétrico em pressão absoluta (AMBROSIO; FERRARI; GALLEANI, 2015). Esse referenciamento pode ser realizado utilizando-se sensores auxiliares ou métodos termodinâmicos aplicados no sinal de pressão (BAŠKOVIČ et al., 2017). Um dos métodos mais precisos e mais robustos presentes na literatura (LEE; YOON; SUNWOO, 2008), é o método dos dois pontos de referência (2PTR). Esse método baseia na hipótese que uma faixa do processo de compressão ocorre através de um processo politrópico com coeficiente politrópico constante. Assim, a pressão absoluta é dada por:

$$p(\theta) = G \left(U(\theta) - \frac{U(\theta_1) - U(\theta_2) \left(\frac{V(\theta_2)}{V(\theta_1)} \right)^{\gamma_{pegg}}}{1 - \left(\frac{V(\theta_2)}{V(\theta_1)} \right)^{\gamma_{pegg}}} \right) \quad (10)$$

G : Ganho do sensor de pressão

U : Sinal de pressão do cilindro medido em tensão

V : Volume instantâneo do cilindro

γ_{pegg} : Coeficiente politrópico de referenciamento
 θ : Ângulo de manivela/virabrequim
 θ_1 : Primeiro ângulo de referência do referenciamento da pressão
 θ_2 : Segundo ângulo de referência do referenciamento da pressão

A literatura (LEE; YOON; SUNWOO, 2008) recomenda valores de θ_1 e θ_2 como -120° e -40° como recomenda a literatura.

2.3.3 Filtragem e Suavização

A filtragem e suavização consiste no processo de remoção de modificações não desejadas no sinal produzido pelo evento físico durante o processo de transdução, transmissão, aquisição, armazenamento, conversão e processamento. Uma vez que a real informação dos processos internos do motor está contida nos componentes de baixa e média frequência, para melhorar a qualidade dos dados adquiridos, é necessário eliminar os componentes de alta frequência. Nesse sentido, deve ser realizada uma filtragem passa-baixas através de filtros digitais de resposta de impulso finita (FIR) ou infinita (IIR). Entretanto, a abrupta variação de pressão próximo a combustão origina um deslocamento de fase durante a filtragem. Por esse motivo, é recomendado que a filtragem seja realizada apenas durante a combustão, e que fora dela, os dados sejam suavizados por médias móveis (MAURYA, 2019).

A frequência de corte depende de muitas variáveis do motor, entretanto, em estudos realizados (DEY, 2012), foi observado que os componentes de frequência até 200 Hz são oriundos dos eventos regulares de compressão e expansão de um ciclo sem combustão, enquanto, de 200 Hz até 3,42 kHz, os componentes de frequência são decorrentes da propagação regular de chama. Nesse sentido, um filtro passa-baixas até 4 kHz é recomendado para avaliar apenas eventos oriundos da combustão.

2.3.4 Mediação Cíclica

No processo de mediação cíclica, as flutuações aleatórias no sinal no decorrer de vários ciclos são removidas. Entretanto, os erros sistemáticos não são (MAURYA, 2019). O número ideal de ciclos para mediação cíclica, depende das características do motor, condições operacionais e da precisão do sistema de aquisição de dados (BRUNT; EMTAGE, 1997; MAURYA, 2016; PAYRI et al., 2010). Em geral, são realizadas mediações de 50 até 1.000 ciclos (CEVIZ et al., 2011).

3 METODOLOGIA

Nessa seção, são apresentados os fundamentos, os procedimentos e aparatos empregados no desenvolvimento do software. Na seção Método de Desenvolvimento, são apresentados os fundamentos básicos da arquitetura do sistema e os processos executados para o desenvolvimento do software. Já na seção Aparato Experimental, são apresentados os instrumentos utilizados no desenvolvimento.

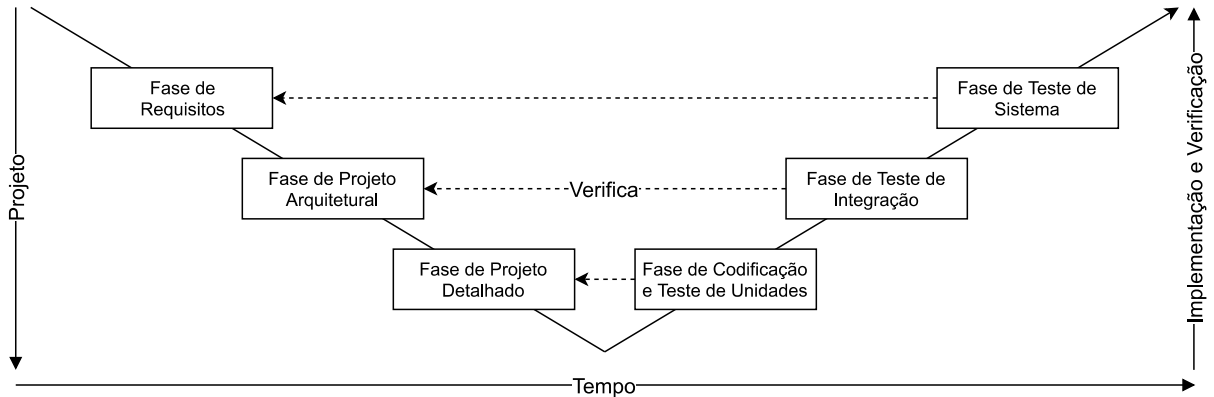
3.1 MÉTODO DE DESENVOLVIMENTO

O processo de desenvolvimento de software é definido pela ABNT NBR ISO/IEC IEEE 16326 como o processo de transformar um conjunto de requisitos em um produto executável. Normalmente, o processo de desenvolvimento é realizado conforme um modelo prescritivo de processos, também chamados de “ciclo de vida”, os quais dividem o processo em fases com objetivos específicos (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2012).

Dentre os modelos prescritivos disponíveis, o Modelo V, base do *Model-Based Design*, foi adotado devido a sua ênfase na realização de testes durante o desenvolvimento como forma de garantia da qualidade do produto. O Modelo V propõe que antes do código ser escrito pelo desenvolvedor, um trabalho detalhado de análise e projeto deve ser feito para que, quando for codificado, o software produzido esteja o mais próximo possível de atender os desejos do usuário. Esse modelo é estritamente sequencial e prevê uma fase de verificação para cada fase de projeto (WAZLAWICK, 2013). A Figura 5 da página 35 apresenta o Modelo V adotado, onde estão indicadas as fases, marcos históricos e a correspondência de verificação das fases de teste.

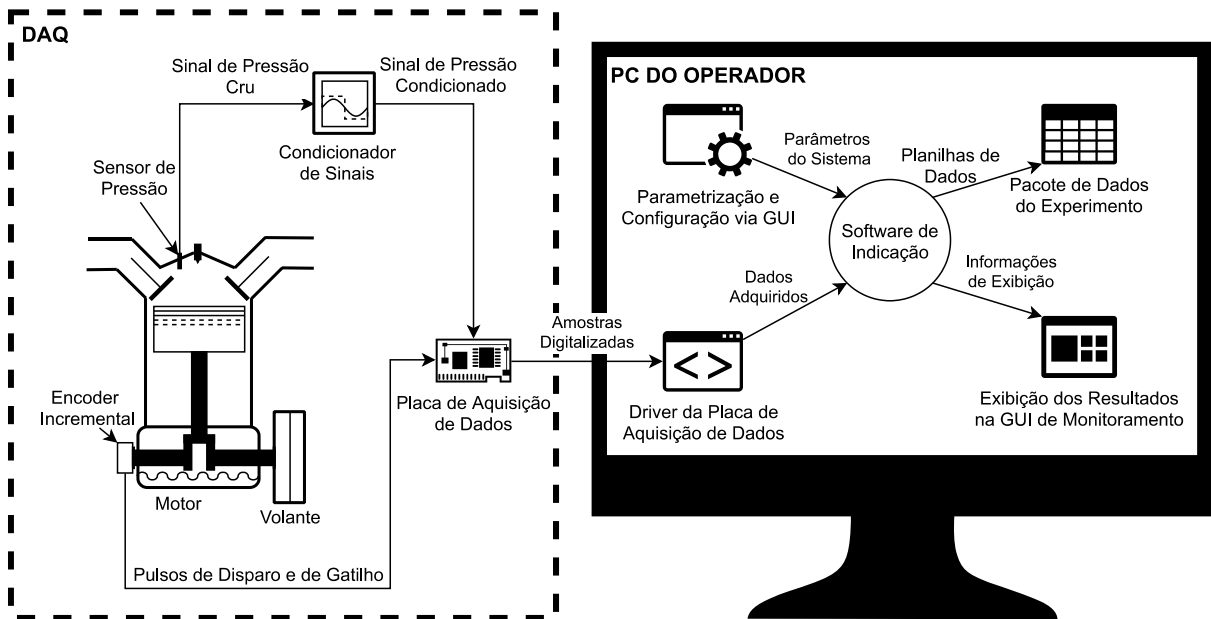
Com base na necessidade do Grupo de Pesquisa em Motores, Combustíveis e Emissões (GPMOT) da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) de um software de indicação operável com a mínima instrumentação possível, a arquitetura do sistema escolhida para o produto corresponde a cadeia básica de medição de pressão. Essa arquitetura está apresentada na Figura 6 da página 35. A parte física desse sistema é composto essencialmente por um motor de combustão interna, um transdutor piezoelétrico de pressão, um condicionador de sinais, um decodificador angular incremental, uma placa de aquisição de dados e um computador pessoal (PC).

Figura 5 - Diagrama de atividades do Modelo V.



Fonte: Adaptado de (WAZLAWICK, 2013).

Figura 6 - Arquitetura e fluxo de dados do sistema.



GUI: Interface Gráfica do Usuário

Nessa arquitetura de sistema, a placa de aquisição adquiriu dois sinais: o sinal dos pulsos do decodificador angular incremental e o sinal do sensor piezoelétrico de pressão. O sinal da pressão do cilindro foi amostrado de acordo com pulsos de disparo externo provindos do sinal dos pulsos do decodificador para garantir uma distância angular constante entre as amostras. A aquisição de dados foi iniciada pelo pulso gatilho do decodificador para realização do referenciamento do ciclo. Além dos dados de pressão do cilindro, também foi adquirida a frequência do motor por meio da leitura

da frequência de um dos canais de pulsos do decodificador. O software adquiriu essas amostradas de pressão do cilindro e frequência do motor por intermédio do *driver* da placa de aquisição de dados. Esses dados foram processados e exibidos no software de indicação de forma a possibilitar o monitoramento em tempo real.

A fase de requisitos tem como objetivo a elaboração das especificações dos requisitos do software. Essa fase foi realizada partindo-se da busca e a identificação dos desejos essenciais do usuário em literaturas técnicas especializadas. A busca foi feita através das palavras chaves: (1) “*software de indicação (indicating software)*”, (2) “*software de indicação de MCI (internal combustion engines indicating software)*” e (3) “*software do sistema de medição (measurement system software)*”. A identificação dos desejos foi realizada baseando-se na pergunta: “*O que o usuário deseja essencialmente em um software de indicação?*”. Para atender os desejos do usuário encontrados, esses foram traduzidos em requisitos do usuário baseando-se na pergunta: “*O que o software precisa ter para atender os desejos do usuário?*”. Então, para garantir que os requisitos do usuário sejam atendidos, esses por sua vez, foram transformados em medidas quantitativas na forma de requisitos de software. Essa transformação foi realizada baseando-se na pergunta: “*Como atender aos requisitos do usuário?*”, especificando para cada requisito, uma grandeza quantitativa e um sentido de melhoria (SDM). Finalmente, foram especificados valores de referência para os requisitos de software de forma a atender adequadamente os desejos do usuário. Essa especificação foi realizada baseando-se na pergunta: “*Que valores os requisitos do software devem possuir, para atender adequadamente os desejos do usuário?*”.

A fase de projeto arquitetural tem como objetivo a elaboração da arquitetura do software, prescrevendo a hierarquia de componentes do programa, interfaces gráficas do usuário (GUIs) e o fluxo de dados entre as unidades funcionais. A fase de projeto arquitetural partiu da divisão dos requisitos do software em componentes de acordo com seu âmbito. Esses foram subdivididos em unidades funcionais de modo a satisfazer os requisitos de software designados. Assim, de acordo com a competência de cada componente e unidade funcional, a hierarquia dos componentes, as GUIs e o fluxo de dados entre as unidades foram definidas, estruturando a arquitetura do software.

A fase de design detalhado tem como objetivo a elaboração das unidades funcionais que constituem os componentes, especificando seu propósito, suas

hipóteses, as sequências de chamadas, as entradas, as saídas, os algoritmos e os fluxos de processamento. A elaboração partiu da construção de algoritmos globais para realizar as funções globais definidas no projeto arquitetural. As etapas dos algoritmos globais foram detalhadas de modo a realizar adequadamente sua respectiva tarefa, considerando hipóteses e métodos apropriados. As sequências de chamadas e os fluxos de processamento foram elaborados naturalmente através do ordenamento das entradas e saídas das etapas de processamento.

A fase de codificação e teste de unidades tem como objetivo produzir os códigos dos componentes e suas respectivas GUIs, garantindo seu pleno funcionamento através de testes de unidades. A codificação foi realizada em MATLAB, um ambiente de desenvolvimento integrado (IDE) próprio para engenharia que além de possuir bibliotecas de funções pré-programas extremamente completas, também permite a realização dos testes durante o desenvolvimento. As GUIs foram desenvolvidas na plataforma GUIDE presente no MATLAB. As unidades foram verificadas através de testes estruturais e testes funcionais. O teste estrutural teve como objetivo verificar a existências de defeitos. Esse teste foi feito executando todas as instruções possíveis utilizando-se valores nominais, singulares e extremos, durante a fase de codificação. O teste funcional teve como objetivo verificar a qualidade da unidade frente a sua especificação. Esse teste foi realizado executando testes específicos para cada respectivo requisito de software. Para realizar os testes funcionais que envolvem processamento de dados do cilindro, foram utilizados dados oriundos de um ensaio realizado através do software de indicação comercial AVL IndiCom Mobile 2015 v2.7. Esse ensaio foi realizado em um motor Ford 1.0L Ecoboost de injeção direta de gasolina (GDI) ao longo dos 14 casos apresentados no Quadro 3 da página 38. Para cada caso ensaiado foram adquiridos dados com resolução angular de $0,1^\circ$ ao longo de 200 ciclos.

A fase de teste de integração tem como objeto garantir que os componentes do software se comportem de acordo com o especificado na fase de projeto arquitetural. Para tal foram verificados se os fluxos de dados entre os componentes e unidades funcionais ocorrem conforme o especificado no projeto arquitetural. Essa verificação foi realizada através da leitura dos dados enviados e recebidos.

Por fim, a fase de teste de sistema visa verificar se a versão do software desenvolvida executa as funcionalidades adequadas para atender os desejos do usuário. Esse tipo de teste normalmente é realizado através de casos de uso, onde

passos pré-planejados são executados. Entretanto, com a finalidade de testar o uso direto do ponto de vista do usuário, foi realizado um teste de aceitação. O teste de aceitação é realizado para validar o software através da experiência do usuário. Para tal, esse teste foi realizado em um ensaio experimental de mapeamento de motor. O mapeamento foi planejado para ser realizado ao longo de quatro rotações: 1200, 1400, 1600, 1800 e 2000 rpm; em três cargas de IMEPn: 2, 4 e 6 bar. Esse ensaio foi realizado em uma célula de testes do Laboratório de Motores da Universidade Federal de Santa Maria (LABMOT).

Quadro 3 - Casos ensaiados para realização dos testes funcionais.

Caso	Rotação (rpm)	Torque (N.m)	λ (-)	IMEPn (bar)	P_{MAX} (bar)	θ_{Pmax} (°)
01*	1493	40,80	1,00	-0,37	21.77	-0.85
02	1498	22,00	1,00	4,04	22.57	16.14
03	1495	49,90	1,00	8,03	40.55	16.88
04	1487	79,10	1,00	12,04	60.11	16.87
05*	1494	40,60	1,00	-0,38	21.79	-0.84
06*	2994	48,30	1,00	-0,54	23.44	-0.92
07	2998	21,10	1,00	4,02	21.00	16.57
08	2994	49,20	1,00	8,02	38.59	16.58
09	2982	78,70	1,00	12,07	56.04	16.53
10*	2994	47,20	1,00	-0,33	23.29	-0.93
11*	4493	41,20	1,00	-0,40	25.08	-1.31
12	4496	20,30	1,00	4,10	23.39	14.39
13	4492	48,20	1,00	8,02	41.02	14.72
14	4479	77,40	1,00	12,03	60.94	14.662

λ : Fator de excesso de ar

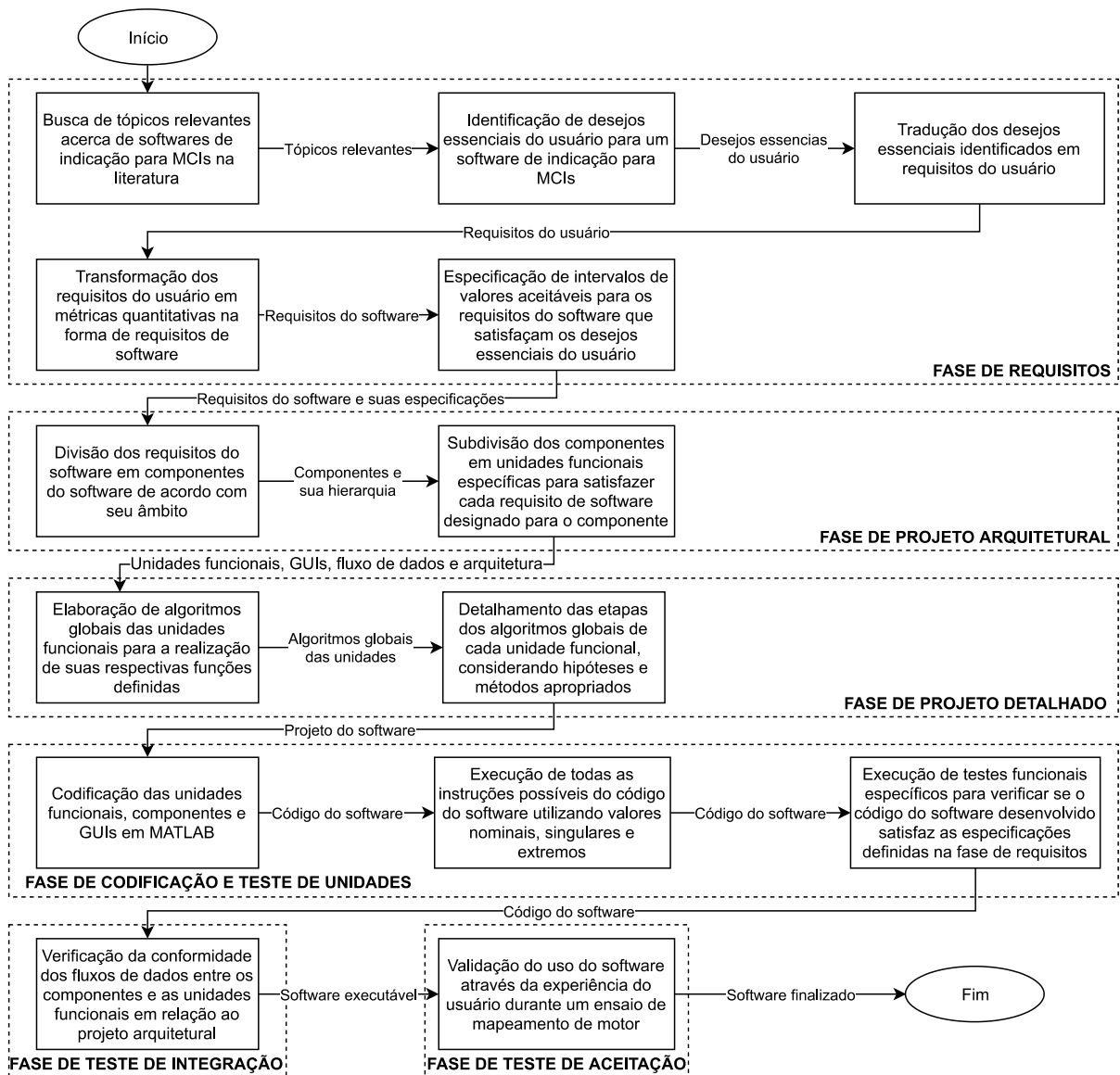
* Ciclos sem combustão

A sequência de atividades realizadas no processo de desenvolvimento descrito acima está resumida no fluxograma da Figura 7 da página 39.

3.2 APARATO EXPERIMENTAL

O teste de aceitação foi realizado em um ensaio em motor quatro tempos monocilíndrico de pesquisa Ricardo Proteus. As especificações do motor estão apresentadas no Quadro 4 da página 39.

Figura 7 - Fluxograma de atividades realizadas no processo de desenvolvimento do software de indicação.



Quadro 4 - Motor ensaiado no teste de aceitação.

Motor	Ricardo Proteus
Número de Cilindros	1
Ciclo de Operação	Quatro Tempos
Mecanismo de Injeção	Injeção Direta
Diâmetro do Cilindro (B)	107 mm
Comprimento da Biela (l)	203,2 mm
Curso do Pistão (L)	115 mm
Razão de Compressão (r_c)	16:1

Durante o ensaio, a frequência do motor foi controlada através do freio dinamométrico de corrente parasitas e a carga no motor foi controlada pelo débito de diesel da bomba injetora. A pressão do cilindro foi medida através de um sensor piezoelétrico AVL GH14D, onde o sinal de pressão gerado foi condicionado em um condicionador de sinais AVL FlexIFEM Advanced. Os dados foram amostrados de acordo com os pulsos gerados por um decodificador incremental angular Dynapar B58N em uma resolução angular de $0,1^\circ$. O sinal de pressão filtrado e os pulsos do decodificador foram recebidos em um bloco de conectores blindados NI BNC-2110, o qual os transmitiu a placa de aquisição de dados NI PCI-6024E instalada no PC para a amostragem. As especificações dos PCs utilizados nesse ensaio e no desenvolvimento do software estão listadas no Quadro 5. A comunicação do software com a placa de aquisição de dados foi realizada pelo *driver* NI-DAQMX 18.1. A experiência do usuário durante o ensaio e os seus resultados foram utilizados para julgar se o software satisfaz ou não os desejos do usuário.

Quadro 5 - Especificação dos PCs utilizados no desenvolvimento e no ensaio.

Propriedade	Ensaio	Desenvolvimento
Processador	ATM Athlon™ 64 X2 Dual Core Processor 4800+	Intel® Core i7-7500U @2,7 GHz
Memória RAM	3x Kingston 2 GB DDR2 800 MHz	1x Smart Modular 8GB DDR4 2400 MHz
Gráfico	NVIDIA GeForce 7300 LE 128 MB DDR2	NVIDIA GeForce 940MX 4 GB GDDR5
Armazenamento	HDD 150 GB	SSD SANSUNG EVO 850 500 GB

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nessa seção, são apresentados o levantamento de requisitos, construção do projeto do software, implementação do projeto, testes de verificação das unidades e do sistema, validação do software desenvolvido em bancada, levantamento dos requisitos mínimos do sistema para a execução do software, e uma análise sobre o software de indicação obtido nos processos de desenvolvimento. Na subseção Fase de Requisitos, os requisitos do software foram levantados e especificados, considerando os desejos do usuário frente as necessidades do GPMOT e da literatura. Na subseção Fase de Projeto de Arquitetural, é apresentada a construção da arquitetura do software de forma a atender aos requisitos do software. Na subseção Fase de Projeto Detalhado, é apresentada a construção dos componentes e unidades funcionais definidos pela arquitetura do software. Na subseção Fase de Codificação e Teste de Unidades, é apresentada a implementação do projeto e a verificação da implementação das unidades funcionais. Na subseção Fase de Teste de Integração, é apresentada a verificação da implementação da arquitetura do software e o atendimento dos requisitos do software frente as especificações realizadas na Fase de Requisitos. Na subseção Fase de Teste de Sistema, é apresentada a validação do software desenvolvido em um teste de bancada de mapeamento de motor. Na subseção Requisitos Mínimos do Sistema, é apresentado o levantamento dos requisitos mínimos do sistema para a aplicação do software desenvolvido. Na subseção Síntese, é apresentada uma breve análise do software desenvolvido, frente aos requisitos do software, desejos do usuário e potencialidade de aplicação.

4.1 FASE DE REQUISITOS

A busca por desejos do usuário foi realizada em três literaturas técnicas especializadas. Nessa busca, foram identificados 7 desejos do usuário essenciais para um software de indicação. O Quadro 6 da página 42 apresenta os desejos identificados, suas fontes literárias de origem e o pretexto que levou a sua identificação.

Quadro 6 - Desejos essenciais identificados.

Desejos do Usuário	Referência Bibliográfica	O usuário deseja, pois
Possibilitar a operação do software em tempo real	(MARTYR; PLINT, 2007; ROGERS, 2010)	é imprescindível para monitoramento e controle operacional do motor em ensaio
Possibilitar a inserção de parâmetros do sistema	(BASSHUYSEN; SCHÄFER, 2004; MARTYR; PLINT, 2007; ROGERS, 2010)	é inerente para a comunicação com instrumentos e cálculos de indicadores
Possibilitar a obtenção de resultados com qualidade adequada	(MARTYR; PLINT, 2007)	é crucial para uma apropriada análise situacional durante o monitoramento
Possibilitar uma clara visualização dos resultados durante o experimento	(ROGERS, 2010)	é fundamental para a identificação de problemas operacionais durante o ensaio
Possibilitar o salvamento de pacotes de dados durante o experimento	(ROGERS, 2010)	é essencial para o registro do experimento e posterior análise da operação do motor
Possibilitar fácil acesso, identificação e visualização dos experimentos salvos	(MARTYR; PLINT, 2007; ROGERS, 2010)	é imprescindível para a praticidade da análise pós-ensaio dos resultados
Possibilitar a exportação dos pacotes de dados salvos para programas externos	(ROGERS, 2010)	é primordial para a documentação dos experimentos realizados e realização de estudos posteriores mais avançados

Com base na pergunta chave, esses desejos do usuário foram traduzidos nos requisitos do usuário dispostos no Quadro 7 da página 42.

Quadro 7 - Tradução dos desejos do usuário em requisitos do usuário.

Desejos do Usuário	Requisitos do Usuário
Possibilitar a operação do software em tempo real	Possuir uma rápida computação
Possibilitar a inserção de parâmetros do sistema	Possuir uma GUI apropriada para atualização dos parâmetros
Possibilitar a obtenção de resultados com qualidade adequada	Possuir um método adequado de referenciamento do ciclo
	Possuir um método adequado de referenciamento da pressão
	Possuir um método adequado de estimativa coeficiente politrópico
Possibilitar uma clara visualização dos resultados durante o experimento	Possuir uma disposição adequada dos objetos na GUI de monitoramento
	Possuir objetos de tamanho apropriado na GUI de monitoramento
Possibilitar o salvamento de pacotes de dados durante o experimento	Possuir uma função de armazenamento
Possibilitar fácil acesso, identificação e visualização dos experimentos salvos	Possuir uma GUI apropriada para acesso e visualização dos experimentos salvos
	Possuir um sistema de identificação dos experimentos salvos
Possibilitar a exportação dos pacotes de dados salvos para programas externos	Possuir uma função de exportação dos pacotes de dados armazenados

Os requisitos do usuário foram transformados em métricas mensuráveis na forma de requisitos de software com base na pergunta chave. A transformação dos requisitos do usuário em requisitos do software está apresentada no Quadro 8.

Quadro 8 - Transformação dos requisitos do usuário em requisitos do software.

Requisito do Usuário	Requisito do Software	SDM
Possuir uma rápida computação	Tempo de execução (ms)	(-)
Possuir uma GUI apropriada para atualização dos parâmetros	Nº de GUIs para parametrização	(+)
Possuir um método adequado de referenciamento do ciclo	Erro absoluto do faseamento angular (grau)	(-)
Possuir um método adequado de referenciamento da pressão	Erro absoluto do referenciamento de pressão (bar)	(-)
Possuir um método adequado de estimativa coeficiente politrópico	Erro relativo absoluto do valor do coeficiente politrópico estimado	(-)
Possuir uma disposição adequada dos objetos na GUI de monitoramento	Complexidade de <i>Layout</i> (%)	(-)
Possuir objetos de tamanho apropriado na GUI de monitoramento	Complexidade de <i>Layout</i> (%)	(-)
Possuir uma função de armazenamento	Nº de funções de armazenamento	(*)
Possuir uma GUI apropriada para acesso e visualização dos experimentos salvos	Nº de GUIs de acesso e visualização dos experimentos salvos	(*)
Possuir um sistema de identificação dos experimentos salvos	Nº de sistemas de identificação de experimentos	(*)
Possuir uma função de exportação dos pacotes de dados armazenados	Nº de formatos de exportação	(+)

SDM: Sentido de Melhoria

(+) Quanto maior, melhor

(-) Quanto menor, melhor

(*) Quanto mais próximo do intervalo, melhor

Os requisitos do usuário de âmbito das características estruturais do software foram transformados em medidas do número componentes estruturais específico para cada respectivo aspecto. Nesses casos, o sentido de melhoria está na direção do centro de intervalo de valores específico, pois, valores fora desse intervalo, ou não atendem o requisito, ou aumentam a complexidade do projeto e ou da implementação. Por outro lado, os requisitos do usuário de âmbito da qualidade foram transformados em métricas específicas de acordo com o respectivo seu contexto, onde, o sentido de melhoria preza pela qualidade.

Para a especificação dos valores de referência dos requisitos do âmbito da qualidade, considerou-se hipóteses específicas de acordo com seu respectivo contexto. A especificação para o tempo de execução, considerou-se a operação limite de um motor quatro tempos a 28.000 rpm. Já para o máximo erro de faseamento

angular, seguiu-se a recomendação da bibliografia para avaliação do fenômeno de detonação (ROGERS, 2010). Por outro lado, para o referenciamento da pressão e estimativa do coeficiente politrópico, considerou-se estudos da influência dos seus erros nos cálculos posteriores. Por fim, para o valor de referência da complexidade de *layout* (LC), considerou-se o valor médio de LC em softwares de acesso remoto da área de trabalho (ALEMERIEN, 2014). As especificações obtidas estão resumidas na Tabela 1.

Tabela 1 - Especificações dos requisitos do software.

Nº	Requisito do Software	Esp.
1	Tempo de execução (ms)	$\leq 4,5$
2	Nº de GUIs para parametrização	≥ 1
3	Erro absoluto do faseamento angular (grau)	$\leq 0,1$
4	Erro absoluto do referenciamento de pressão (bar)	$\leq 0,1$
5	Erro relativo absoluto do valor do coeficiente politrópico estimado	$\leq 1\%$
6	Complexidade de <i>layout</i> LC (%)	≤ 50
7	Nº de funções de armazenamento	= 1
8	Nº de GUIs de acesso e visualização dos experimentos salvos	= 1
9	Nº de sistemas de identificação de experimentos	= 1
10	Nº de formatos de exportação	≥ 1

4.2 FASE DE PROJETO DE ARQUITETURAL

Os requisitos de software foram divididos de acordo com o seu respectivo âmbito operacional, elencando as funções necessárias para atender aos respectivos requisitos de software. Com base nas funções elencadas, foram elaborados componentes de software para executar as tarefas necessárias para cumprir a função demandada. A divisão dos requisitos de acordo com o âmbito, as funções elencadas e os componentes elaborados, estão apresentados no Quadro 9 abaixo.

Quadro 9 - Divisão dos requisitos de software de acordo com seu respectivo âmbito.

(contínua)

Âmbito da	Funções	Componente	Requisitos de Software
Operação	Captação de instruções do usuário	Painel de Controle	1, 3, 4, 5, 6 e 7
	Processamento de informações		
	Exibição dos resultados		
Parametrização	Inserção de parâmetros do sistema	Configuração do DAQ	2
	Documentação do experimento	Cadastro do Experimento	

Quadro 9 - Divisão dos requisitos de software de acordo com seu respectivo âmbito.

(conclusão)

Armazenagem	Armazenamento dos pacotes de dados	Repositório de Experimentos	8,9 e 10
	Acesso aos pacotes de dados armazenados		
	Identificação dos experimentos realizados		
	Exportação dos pacotes de dados		

Os componentes por sua vez, foram subdivididos em unidades funcionais para realizar funções específicas para satisfazer os requisitos de software. A divisão dos componentes em unidades funcionais e suas respectivas funções específicas está apresentado no Quadro 10 abaixo.

Quadro 10 - Divisão dos componentes em unidades funcionais.

(continua)

Componente	Requisitos de Software	Unidade Funcional	Funções Específicas
Painel de Controle	6	GUI do Painel de Controle	Capitação de instruções do usuário
			Acesso aos outros componentes
			Capitação de instruções do usuário
	1, 3, 4, 5, e 7	Operação do Software	Estabelecer comunicação com a placa de aquisição
			Configurar a sessão de aquisição de dados
			Adquirir e processar os dados de pressão do cilindro
			Exibir resultados processados na GUI do Painel de Controle
	Controle do fluxo de dados	Banco de dados do Painel de Controle (BDPC)	Enviar o pacote de dados para armazenamento
Centralizar as informações da parametrização do sistema e do experimento			
Autoconfiguração do software	Inicialização	Importar os parâmetros configurados anteriormente e carregar o banco de dados de experimentos	
	Encerramento	Exportar os parâmetros configurados anteriormente e carregar o banco de dados de experimentos	
Cadastro de Experimentos	2	GUI do Cadastro de Experimentos	Inserção da parametrização do experimento
			Configuração da interface com os parâmetros cadastrados anteriormente no software

Quadro 10 - Divisão dos componentes em unidades funcionais.

(conclusão)

		Importação	Carregar pré-configurações
		Exportação	Exportar pré-configurações
Configuração do DAQ	2	GUI do Configuração do DAQ	Inserção da parametrização do experimento
			Configuração da interface com os parâmetros cadastrados anteriormente no software
		Verificação	Verificar se as configurações a serem carregadas são possíveis no sistema operacional (SO)
		Importação	Carregar pré-configurações
		Exportação	Exportar pré-configurações
Repositório de Experimentos	8, 9 e 10	GUI do Repositório de Experimentos	Acesso, visualização e gerenciamento dos experimentos salvos
			Identificação dos experimentos salvos
			Captação de instruções do usuário
			Configuração da interface de acordo com os experimentos salvos
	Armazenamento dos pacotes de dados (PD) salvos	Banco de dados do Repositório de Experimentos (BDRE)	Armazenar os pacotes de dados enviadas durante os experimentos
10	Exportação	Exportar um pacote de dados para um formato externo	

Como pode ser observado no Quadro 10 acima, além de unidades funcionais que tem como objetivo atender os requisitos de software definidos, também foram definidas outras unidades funcionais auxiliares para atender requisitos de software implícitos. Uma vez que os bancos de dados elaborados têm como objetivo centralizar e organizar as informações adquiridas da parametrização e do experimento, os fluxos de dados que os comunicam devem ser estruturados. Nesse sentido, foram elaboradas quatro estruturas de dados, de modo a organizar a comunicação entre os

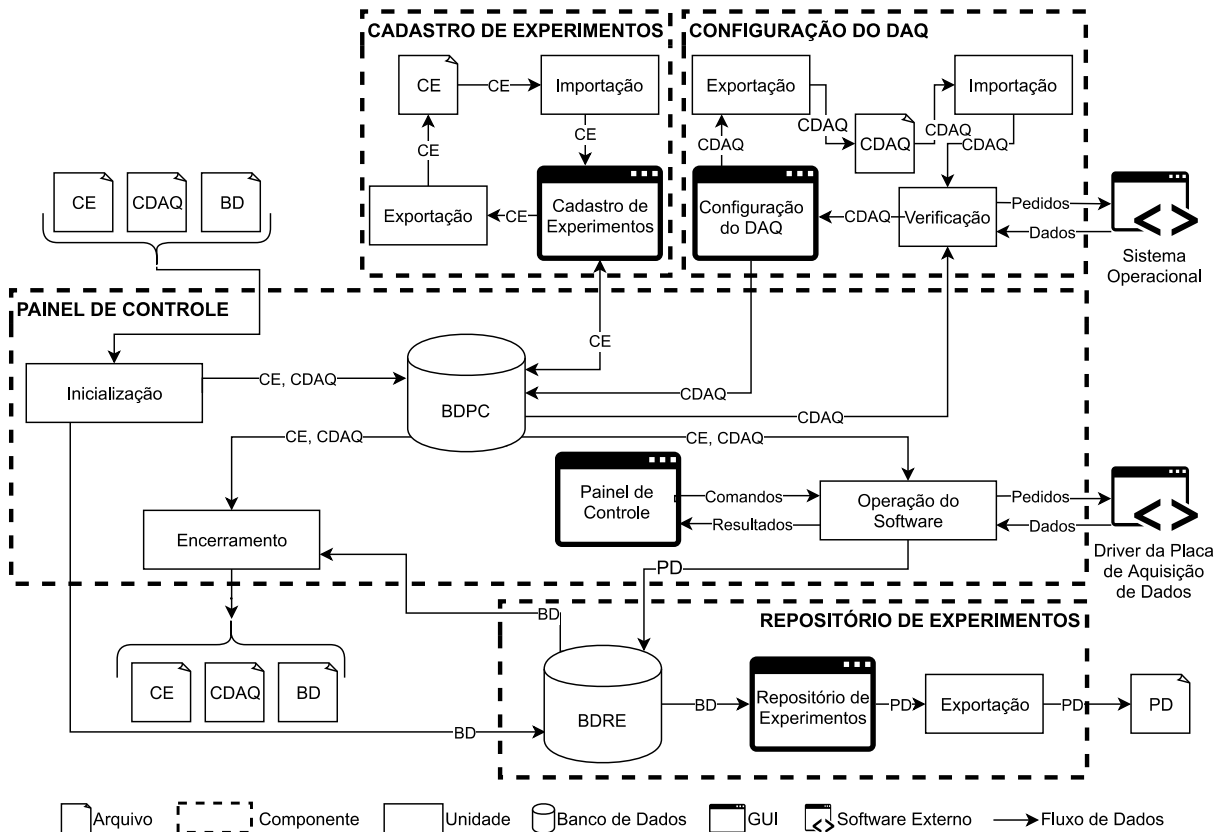
componentes e unidades funcionais do software. Essas estruturas de dados, sua abreviação e seu conteúdo estão descritos no Quadro 11 abaixo.

Quadro 11 - Estrutura de dados elaboradas.

Estrutura de Dados	Abreviação	Descrição
Cadastro de experimentos	CE	Parâmetros do experimento
Configuração do DAQ	CDAQ	Parâmetros do DAQ
Pacote de dados	PD	Pacote de dados adquirido durante o experimento
Banco de dados de experimentos	BD	Conjunto de todos os pacotes de dados armazenados no Banco de dados do Repositório de Experimentos (BDRE)

Essas estruturas de dados foram utilizadas para elaborar o fluxo de dados e estruturar a arquitetura do software, tal como está apresentada na apresentada na Figura 8, onde as GUIs estão indicadas, a hierarquia dos componentes é centralizada no Painel de Controle e o fluxo de dados está mostrada através das setas.

Figura 8 - Arquitetura do software desenvolvida.



CE: Cadastro do experimento
 CDAQ: Configuração do DAQ
 BD: Banco de dados dos experimentos

BDPC: Banco de dados do Painel de Controle
 BRDE: Banco de dados do Repositório de Experimentos
 PD: Pacote de dados

4.3 FASE DE PROJETO DETALHADO

Nessa subseção, apenas a unidade funcional “Operação do Software”, dentro do painel de controle, é descrita detalhadamente, pois ela é a unidade funcional essencial que caracteriza um software de indicação de pressão para MCIs.

4.3.1 Painel de Controle

Diferentemente das unidades funcionais de Inicialização e Encerramento que apenas realizam a importação, exportação e direcionamento de informações, a unidade de Operação do Software precisa, além de permitir o usuário a iniciar e parar a operação do software, permitir o usuário a armazenar dados no banco de dados do Repositório de Experimentos (BDRE). Para isso, foram elaborados dois botões para a GUI do Painel de Controle. Esses botões estão descritos no Quadro 12 abaixo.

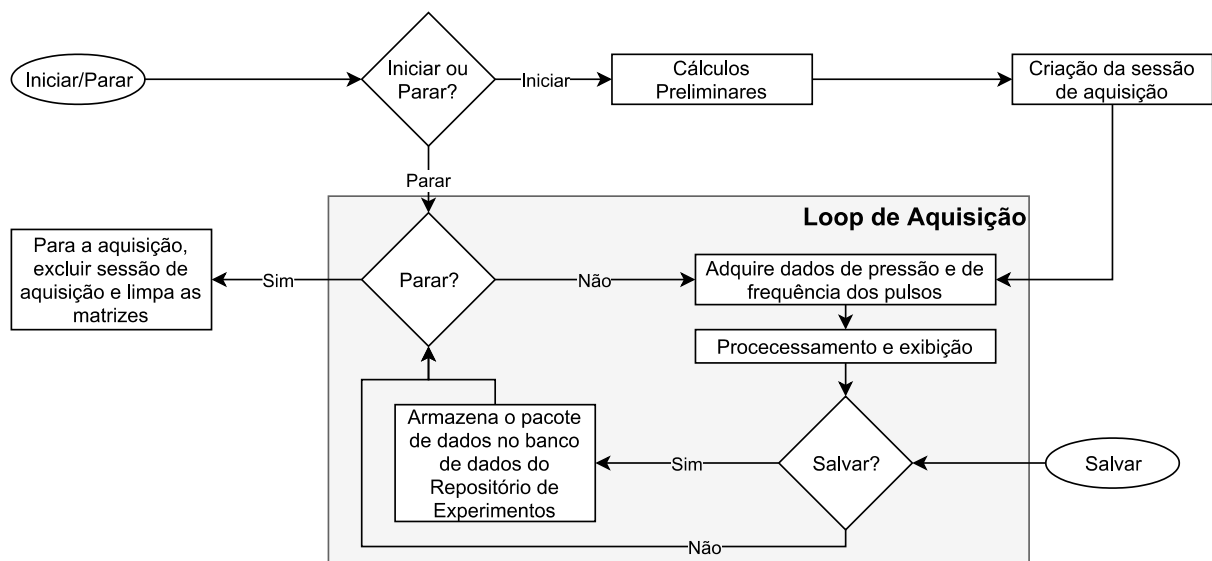
Quadro 12 - Botões definidos para a unidade funciona de Operação do Software.

Botão	Tipo	Descrição
Iniciar/Parar	Alternância	Inicia ou interrompe a aquisição e o processamento de dados
Salvar	Pressionar	Envia um pacote de dados para o BDRE durante o experimento

Para a realização das devidas funções operacionais através desses três botões, foi elaborado o algoritmo global apresentado na Figura 9 abaixo. Nesse algoritmo, o botão de alternância identifica se a operação deve ser iniciada ou parada. Caso deva ser iniciado, uma etapa de cálculos preliminares é realizada para evitar computações repetitivas durante o loop de aquisição. Em seguida, a comunicação com a placa de aquisição de dados através de seu *driver* é estabelecida e configurada, criando a sessão de aquisição. Então, a amostragem é iniciada pelo pulso gatilho e são adquiridas o número de amostras equivalentes a um ciclo inteiro (S_N) ao passo que os pulsos de disparo coordenam a amostragem. O ciclo adquirido é processado e os resultados são exibidos na GUI do Painel de Controle. Para permitir o armazenamento de um pacote de dados, após a exibição é verificado se o usuário solicitou o armazenamento. Caso sim, o pacote de dados é armazenado no BDRE, caso não, o loop segue para a próxima etapa. Para evitar que pacotes de dados

incompletos sejam salvos, o botão “Salvar” apenas é habilitado quando as matrizes de pré-armazenamento estão completas. Por fim, é verificado se o usuário ordenou o interrompimento do funcionamento. caso não essa verifica se o usuário solicitou a parada da operação do software. Caso sim, o loop de aquisição é interrompido, a sessão de aquisição é excluída e as matrizes e variáveis são limpas, caso não, o loop de aquisição é continuado.

Figura 9 - Algoritmo global da unidade de Operação do Software.



Os cálculos preliminares foram definidos após a análise dos cálculos necessários para o processamento de dados. O tamanho do pacote de dados a ser armazenado (n_c), correspondente ao número de ciclos pré-armazenados e deve ser fornecido pelo usuário na parametrização do experimento. Além disso, durante o desenvolvimento da etapa de criação da sessão de aquisição de dados, evidenciou-se a necessidade de serem informados os seguintes dados:

- Nome dispositivo (placa de aquisição de dados);
- Canal analógico do sinal de pressão;
- Configurações do terminal aquisição analógica;
- Canal PFI (Interface Programável de Função) de pulsos gatilho;
- Canal PFI de pulsos de disparos;
- Canal contador de amostragem de frequência.

Além desses, para fins de processamento de dados, também é preciso informar:

- Ângulo de deslocamento do PMS (θ_{offset});
- Número de pulsos de disparo por revolução do motor (n_{pr});
- Ganho do sensor piezoelétrico de pressão (G) em unidade de pressão por unidade de tensão.

Os quais, pela definição arquitetural realizada anteriormente, devem ser inseridos na Configuração do DAQ. Uma vez inseridos esses dados, a aquisição pode ser configurada, entretanto, ainda é necessário informar a quantidade de amostras a ser adquiridas por processamento. Com a finalidade de processar ciclo a ciclo, esse número é o equivalente ao número de amostras equivalentes a um ciclo (S_N), onde, S_N é dado por:

$$S_N = n_r n_{pr} \quad (11)$$

n_{pr} : Número de pulsos de disparo por revolução do motor

n_r : Número de voltas da manivela/virabrequim por curso de expansão

A etapa de “Processamento e Exibição” desenvolvida, parte da realização das três etapas essenciais de processamento do sinal de pressão: referenciamento do ciclo, referenciamento da pressão e filtragem e suavização. O referenciamento do ciclo foi definido para ser realizado atribuindo a primeira amostra adquirida a posição do gatilho, dada pelo ângulo de deslocamento do PMS (θ_{offset}). Para tal, bastou deslocar o ângulo de manivela ideal (θ_{raw}), onde o ciclo se inicia e termina no PMS de admissão, para a posição do gatilho. Assim, o ângulo de manivela/virabrequim (θ) real de cada amostra, é dado por:

$$\theta = \theta_{raw} + \theta_{offset} \quad (12)$$

θ_{offset} : Ângulo de deslocamento do PMS

θ_{raw} : Ângulo de manivela ideal

O referenciamento da pressão foi definido para ser realizado pelo método de dois pontos de referência (2PTR), tal como foi revisado na subseção 2.3.2. Já o processo de filtragem e suavização foi definido, com base no que foi visto na subseção 2.3.3, para ser realizado através de um filtro passa-baixas com frequência de corte de 4 kHz.

Definidas as três etapas básicas, os indicadores e diagramas para ser exibidos na GUI do Painel de Controle para o monitoramento foram elencados de acordo com

a revisão feita na subseção 2.1. O Quadro 13 abaixo apresenta todos os indicadores e diagramas escolhidos e seu respectivo aspecto de análise no monitoramento.

Quadro 13 - Indicadores e diagramas escolhidos para exibição.

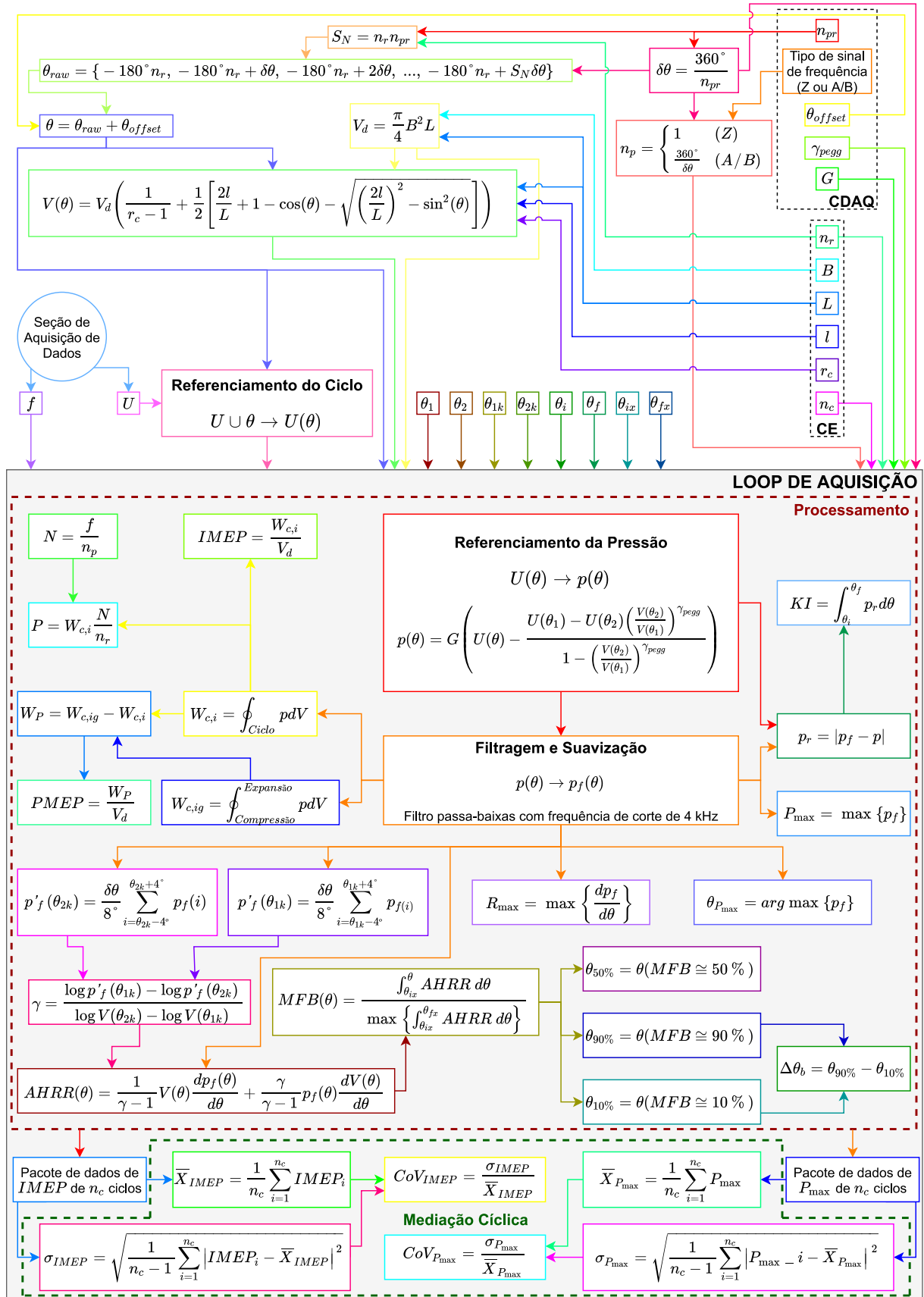
Indicadores	Aspecto de Análise
P_{max}	Carga desenvolvida e limite estrutural
$\theta_{P_{max}}$	Fase da combustão
R_{max}	Ocorrência de detonação
KI	Ocorrência de detonação
$\theta_{10\%}$	Fim do crescimento inicial da chama
$\theta_{50\%}$	Fase da combustão
θ_{EOC}	Fim da combustão
$\Delta\theta_b$	Duração do crescimento turbulento de chama
N	Frequência do motor
P_i	Carga desenvolvida
$IMEP$	Carga desenvolvida
$PMEP$	Perda/ganho de carga por bombeamento
CoV_{IMEP}	Estabilidade da combustão
$CoV_{P_{max}}$	Variação cíclica característica da combustão
Diagramas	Aspecto de Monitoramento
$AHRR - \theta$	Forma em que o calor é liberado
$MFB - \theta$	Forma em que a massa é queimada
$P - \theta$	Qualidade do sinal e ocorrência de eventos
$P - V$	Erros de medição e eficiência
$KI - V_{cn}$	Ocorrência de detonação e sua frequência

KI – Intensidade de Detonação

V_{cn} – Contagem de ciclos adquiridos

Para estruturar o algoritmo de “Processamento e Exibição”, levantou-se na literatura, o equacionamento e as entradas necessárias para o cálculo das curvas e indicadores. Com base nessas informações, foi elaborado um fluxograma de equacionamento e cálculos, de modo a estruturar uma sequência de cálculos e, desta forma, evidenciar quais cálculos precisam ser realizados no loop de aquisição, quais cálculos podem ser feitos na seção de Cálculos Preliminares, quais parâmetros precisam ser informados pelo usuário e onde esses parâmetros devem ser informados. O resultado desse processo de estruturação do fluxograma está apresentado na Figura 10 da página 52.

Figura 10 - Fluxograma do equacionamento e cálculos.



AHRR: Taxa de liberação de calor aparente

B : Diâmetro do cilindro
 $CDAQ$: Configuração do DAQ
 CE : Cadastro do experimento
 CoV_{IMEP} : Coeficiente de variação da pressão média efetiva indicada líquida
 $CoV_{P_{max}}$: Coeficiente de variação da máxima pressão do cilindro
 f : Frequência do pulso medida
 G : Ganho do sensor piezoelétrico de pressão
 $IMEP$: Pressão média efetiva indicada
 KI : Intensidade de detonação
 L : Curso do pistão
 l : Comprimento da biela
 MFB : Fração de massa queimada
 N : Frequência de rotação do motor
 n_c : Tamanho do pacote de dados a ser armazenado
 n_p : Número de pulsos por revolução do canal de frequência
 n_{pr} : Número de pulsos de disparo por revolução do motor
 n_r : Número de voltas da manivela/virabrequim por curso de expansão
 P : Potência p : Pressão do cilindro
 P_{max} : Pressão máxima do cilindro
 $PMEP$: Pressão média efetiva de bombeamento
 p_f : Pressão do cilindro filtrada
 p'_f : Pressão do cilindro suavizada
 p_r : Ruído de combustão
 R_{max} : Máxima taxa de subida de pressão do cilindro
 r_c : Razão de compressão
 S_n : Número de amostras de um ciclo inteiro
 U : Sinal de pressão do cilindro medido em tensão
 V : Volume instantâneo do cilindro
 V_d : Volume deslocado pelo pistão entre o PMS e PMI
 \bar{X}_{IMEP} : Média da pressão média efetiva indicada líquida do pacote de dados
 $\bar{X}_{P_{max}}$: Média da máxima pressão do cilindro pacote da dados
 $W_{c,i}$: Trabalho líquido
 $W_{c,ig}$: Trabalho bruto
 W_p : Trabalho de bombeamento
 γ : Razão entre os calores específicos
 γ_{pegg} : Coeficiente politrópico de referenciamento da pressão
 $\Delta\theta_b$: Crescimento turbulento de chama
 $\delta\theta$: Resolução angular
 θ : Ângulo de manivela/virabrequim
 θ_1 : Primeiro ângulo de referência do referenciamento da pressão
 $\theta_{10\%}$: Ângulo de 10% de massa queimada
 θ_{1k} : Ângulo inicial de avaliação da inclinação da curva do diagrama $\log p - \log V$
 θ_2 : Segundo ângulo de referência do referenciamento da pressão
 θ_{2k} : Ângulo final de avaliação da inclinação da curva do diagrama $\log p - \log V$
 $\theta_{50\%}$: Fase da combustão
 $\theta_{90\%}$: Ângulo de 90% de massa queimada
 $\theta_{P_{max}}$: Ângulo de máxima pressão do cilindro
 θ_f : Ângulo final de avaliação da intensidade de detonação
 θ_{fx} : Ângulo de término do cálculo da fração de massa queimada
 θ_i : Ângulo inicial de avaliação da intensidade de detonação
 θ_{ix} : Ângulo de início do cálculo da fração de massa queimada
 θ_{offset} : Ângulo de deslocamento do PMS
 θ_{raw} : Ângulo de manivela/virabrequim ideal
 σ_{IMEP} : Desvio padrão da pressão média efetiva indicada líquida do pacote de dados
 $\sigma_{P_{max}}$: Desvio padrão da máxima pressão do cilindro do pacote de dados

O fluxograma da Figura 1 acima, evidência que o referenciamento do ciclo, bem como, o cálculo de uma série de informações utilizadas de entrada nos cálculos do processamento e da mediação cíclica, dentro do loop de aquisição, podem ser realizados na seção de Cálculos Preliminares. Além disso, pode-se elencar uma série de parâmetros que devem ser informados no cadastro do experimento (CE) na configuração do DAQ (CDAQ). Os equacionamentos empregados no fluxograma, que ainda não foram apresentados, são apresentados a partir de agora, juntamente, com os valores de entrada utilizados diretamente dentro do software.

O número de pulsos por revolução do canal de frequência (n_p), necessário para o cálculo da velocidade de rotação do motor, é depende do tipo de sinal em que a frequência é medida. Assim, sendo dada por:

$$n_p = \begin{cases} 1, & \text{sinal dos pulsos de gatilho (Z)} \\ \frac{360^\circ}{\delta\theta}, & \text{sinal dos pulsos de disparo (A ou B)} \end{cases} \quad (13)$$

onde:

$$\delta\theta = 360^\circ/n_{pr} \quad (14)$$

n_{pr} : Número de pulsos de disparo por revolução do motor

O $W_{c,i}$, usado para obter P_i e $IMEP$, foi definido para ser calculado através da Equação (3) ao longo de toda a curva de pressão do cilindro. Para a realização da integração, foi definido o método dos trapézios em razão de sua simplicidade. Esse método aproxima a área da curva pela soma da área de diversos trapézios menores (CHAPRA; CANALE, 2016). Como se trata de uma integração cíclica, foi definindo dois termos de integração necessários, um para integrar a área da curva e outro para fechar a integral.

O W_p usado para se obter a $PMEP$, em razão da região de trocas gasosas ser dívida pela região de combustão, seu cálculo foi definido através da relação de W_p com $W_{c,i}$ e $W_{c,ig}$ dada pela equação (HEYWOOD, 2018):

$$W_p = W_{c,ig} - W_{c,i} \quad (15)$$

$W_{c,i}$: Trabalho indicado líquido

$W_{c,ig}$: Trabalho indicado bruto

onde o cálculo $W_{c,ig}$ foi definido pela integral cíclica entre os cursos de expansão e compressão.

A definição do indicador de intensidade de detonação (KI) foi realizada considerando os seguintes fatores:

- A detonação se manifesta no sinal de pressão através de uma subida abrupta seguida de um decaimento oscilatório (WANG; LIU; REITZ, 2017) originado por ondas de pressão que geram componentes de alta frequência (ZHOU et al., 2018);
- Derivadas numéricas amplificam o ruído presente no sinal (MAURYA; PAL; AGARWAL, 2013);
- Valores singulares são sensíveis a ruídos de aquisição (SHAHLARI; GHANDHI, 2012).

Para contabilizar apenas ruídos de combustão (p_r) de alta frequência, partiu-se do pressuposto que os componentes de alta frequência removidos do sinal de pressão na filtragem podem ser obtidos através da relação:

$$p_r = |p_f - p| \quad (16)$$

p : Pressão do cilindro

p_f : Pressão do cilindro filtrada

O intervalo angular de avaliação da KI foi definido em um intervalo fixo centrado em $\theta = 0^\circ$ com uma janela de 60° de forma a contabilizar a região de combustão, ou seja, $\theta_i = -30^\circ$ e $\theta_f = 30^\circ$, tal como utilizado em estudos presentes na literatura (BRECQ; LE CORRE, 2005). Vale ressaltar que a métrica adotada para a intensidade de detonação é uma versão simplificada do SEPO (energia do sinal das oscilações da pressão), uma das métricas de intensidade de detonação mais utilizadas (WORRET et al., 2002). Diferentemente da métrica adotada, o SEPO integra o quadrado das oscilações de pressão em um intervalo angular variável.

Visando um menor custo computacional, definiu-se um intervalo de avaliação da $AHRR$ de -30° até 90° , ou seja, $\theta_{if} = -30^\circ$ e $\theta_{xf} = 90^\circ$, correspondente ao intervalo angular onde a combustão usualmente induz vibração para o bloco do motor (YANG; YONG, 2018). A razão entre os calores específicos (γ) para o cálculo do $AHRR$ foi definida para ser estimado através da inclinação da curva $\log p - \log V$, tal como foi visto na subseção 2.1. Em virtude da sensibilidade de valores singulares a ruídos

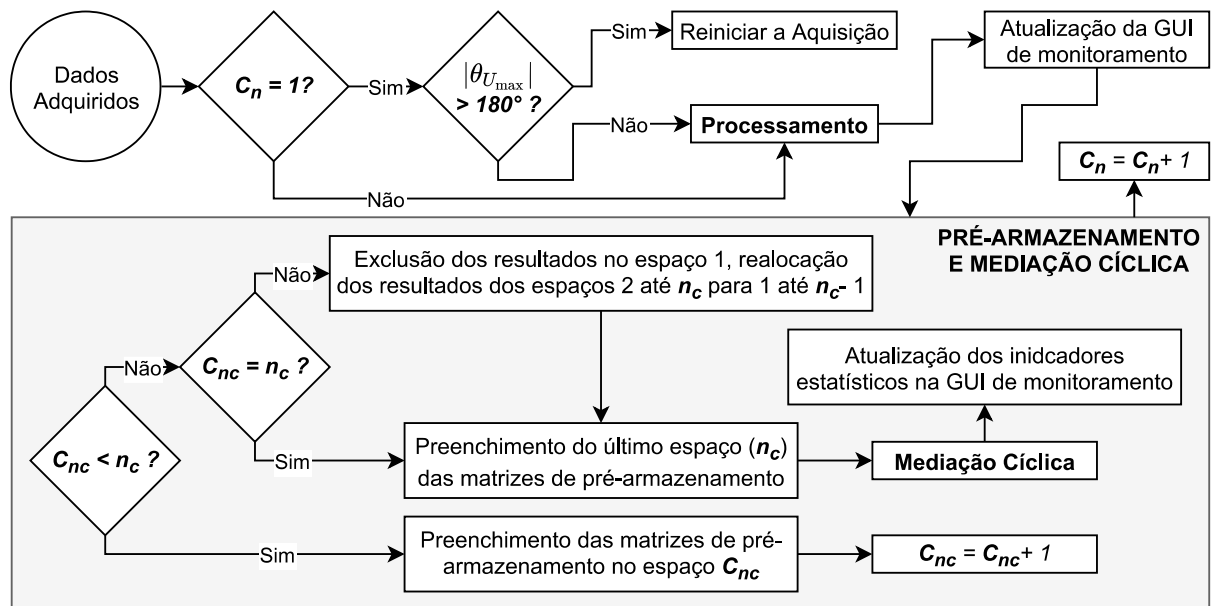
contidos no sinal de pressão, para o cálculo de γ , ao invés de usar a pressão do cilindro filtrada, foi definido pra ser calculado através uma média móvel centrada nos ângulos de referência em uma janela de 8° , tal como recomenda a literatura (ROGERS, 2010). Essa pressão do cilindro suavizada (p'_f) é dada por:

$$p'_f(\theta) = \frac{\delta\theta}{8^\circ} \sum_{i=\theta-4^\circ}^{\theta+4^\circ} p_f(i) \quad (17)$$

p_f : Pressão do cilindro
 $\delta\theta$: Resolução angular
 θ : Ângulo de manivela/virabrequim

Com o equacionamento de processamento definido, o algoritmo da etapa de “Processamento e Exibição” foi estruturado. O algoritmo desenvolvido está apresentado na Figura 11.

Figura 11 - Algoritmo da etapa e Processamento e Exibição.



C_n : Número de aquisições
 C_{nc} : Número de ciclos pré-armazenados
 n_c : Tamanho do pacote de dados a ser armazenado
 θ_{Umax} : Ângulo de máxima tensão

No topo do algoritmo há uma verificação de referenciamento de ciclo. Essa verificação, que ocorre no primeiro ciclo ($C_n = 1$), foi desenvolvida para motores ciclo em quatro tempos, em que a posição angular pode ficar defasada em 360° da convenção adotada. A convenção adotada, consiste na posição angular igual a 0° ,

corresponder ao ponto morto superior (PMS) que separa o curso de compressão do curso de expansão. Nesse sentido, caso a máxima tensão esteja em uma posição angular mais distante que 180° do PMS de expansão ($|\theta_{U_{max}} > 180^\circ|$), a aquisição é reiniciada. Esse processo ocorre até que o referenciamento do ciclo esteja de acordo com a convenção adotada. Quando de acordo, o processamento é realizado, os resultados são exibidos na GUI de monitorando e o pré-armazenamento é iniciado. Quando o número de ciclos armazenados (C_{nc}) for igual ao tamanho do pacote de dados a ser armazenado (n_c), a mediação cíclica é iniciada e os resultados estatísticos são exibidos na GUI de monitoramento. Nos seguintes processamentos posteriores a esse, ocorre um processo de retroalimentação das matrizes de pré-armazenamento, onde o primeiro ciclo armazenado é excluído, o restante é movido 1 espaço matricial para trás e o ciclo recém processado preenche o último espaço da matriz de pré-armazenamento.

4.3.2 Repositório de Experimentos

Para atender ao requisito de visualização e identificação dos experimentos salvos, foi definido que a GUI do “Repositório de Experimentos” deve possuir uma tabela. Nessa tabela, os experimentos salvos são ordenados nas linhas, onde em cada coluna é exibido informações de identificação e os resultados médios dos indicadores. Para a identificação do experimento, foram definidas quatro informações básicas: número do projeto, número do teste, número da medida e data. Esses, exceto a data, tal como foi definido no projeto arquitetural, devem ser fornecidos pelo usuário no “Cadastro de Experimentos”.

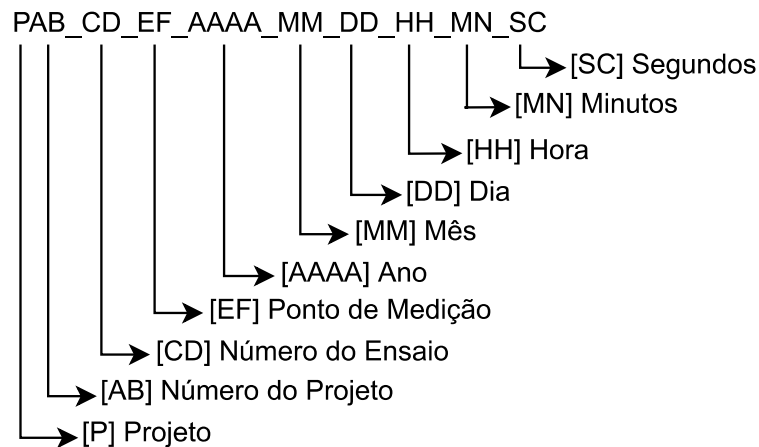
Para o solicitar a exportação do experimento, foi definido um botão na GUI do Repositório de Experimentos. Esse botão quando acionado, identificar o experimento selecionado na tabela e envia sua identificação matricial para a unidade funcional de exportação. Essa unidade por sua vez, foi definida de forma a exportar em quatro arquivos, três destas tabelas no formato “.xls” e o último, um arquivo de texto no formato “.rtf”. Esses arquivos são:

1. Resultados Médios dos Ciclos: planilha com os resultados médios do pacote de dados em coluna;
2. Resultados por Ciclo: planilha com resultados calculados ciclo a ciclo, onde cada linha corresponde a um ciclo e cada coluna um resultado;

3. Dados de Pressão Bruto: planilha com os dados bruto de pressão, onde cada linha corresponde a um ângulo do virabrequim, cada coluna após a primeira, corresponde a pressão do cilindro de um ciclo. Na primeira coluna devem estar dispostos os ângulos do virabrequim para cada amostra de pressão;
4. Registro do Ensaio: arquivo de texto com as principais informações referente ao experimento, possuindo além do cadastro do experimento, os principais resultados médios do pacote de dados.

Objetivando uma melhor organização e identificação dos experimentos, definiu-se que esses arquivos serão armazenados dentro de uma sub pasta referente ao ensaio, dentro de uma outra pasta própria para os testes realizados nessa data. Para identificação do ensaio através da sub pasta e nome dos arquivos, foi adotada a codificação utilizada nos experimentos do Laboratório de Motores da UFSM (LABMOT). A Figura 12 resume o formato da codificação adotada.

Figura 12 - Codificação para identificação de ensaio.



4.3.3 Cadastro de Experimentos

Para atender a sua função de adquirir informações referentes ao ensaio e ao motor, foi definido que sua GUI deve possuir a forma de formulário. Para as unidades funcionais de “Importação” e “Exportação”, foram definidos dois botões, “Carregar” e “Salvar”, para seus respectivos acionamentos. Um terceiro botão, “OK”, foi definido para atualizar as informações do BDPC.

As informações a serem coletadas foram elencadas considerando as entradas para processamento e exemplos de documentação de ensaios presentes na literatura (MARTYR; PLINT, 2007). O Quadro 14 abaixo lista essas informações elencadas.

Quadro 14 - Lista de informações do formulário do Cadastro de Experimentos.

N	Informação	N	Informação	N	Informação
1	Número do projeto	11	Temperatura do fluido de arrefecimento	21	Comprimento da biela l
2	Número do ensaio	12	Umidade relativa do ar	22	Curso do pistão L
3	Ponto de medição	13	Combustível	23	Razão de compressão r_c
4	Operador	14	Sistema de medição de consumo de combustível	24	Número de rotações por ciclo do motor n_r
5	Dados do operador	15	Tamanho do Pacote de Dados n_c	25	Elevação da válvula de admissão (IVL)
6	Objetivos do ensaio	16	Motor	26	Abertura da válvula de admissão (IVO)
7	Pressão atmosférica	17	Número de cilindros	27	Fechamento da válvula de admissão (IVC)
8	Pressão do óleo	18	Sistema de injeção de combustível	28	Elevação da válvula de exaustão (EVL)
9	Temperatura ambiente	19	Tipo de sistema de arrefecimento	29	Abertura da válvula de exaustão (EVO)
10	Temperatura do óleo	20	Diâmetro do cilindro B	30	Fechamento da válvula de exaustão (EVC)

4.3.4 Configuração do DAQ

Tal como o Cadastro de Experimentos, foi definido que a GUI da Configuração do DAQ deve possuir forma de formulário e os mesmos três botões com as mesmas finalidades. Para se evitar erros de parametrização com informações de dispositivos que não estão conectados ao PC, a unidade funcional de “Verificação” foi idealizada para solicitar e comparar as possíveis configurações, verificando se a configuração a ser carregada é realmente exequível. Caso essas configurações não sejam exequíveis, uma configuração possível padrão será pré-configurada.

As informações necessárias para coleta através da Configuração do DAQ foram elencadas de acordo com as necessidades da unidade funcional de “Operação do Software” do Painel de Controle. Essas informações estão listadas no Quadro 15 da página 26 junto com suas respectivas serventias.

Quadro 15 - Informações necessários do DAQ para o Painel de Controle.

N	Informação	Serventia
1	Dispositivo	Criação de sessão de comunicação com dispositivo
2	Canal Analógico	Amostragem do sinal de pressão
3	Configuração do Terminal	Forma de leitura da tensão do sinal de pressão
4	G	Conversão da tensão para pressão
5	γ_{pegg}	Realização do referenciamento da pressão
6	Linha PFI do Gatilho	Disparo da aquisição e referenciamento angular
7	Linha PFI de Disparos	Amostragem de pressão por disparo externo
8	Porta de Frequência	Cálculo da frequência do motor
9	Tipo de sinal de f	Cálculo da velocidade de rotação do motor
10	θ_{offset}	Referenciamento do ciclo

4.4 FASE DE CODIFICAÇÃO E TESTE DE UNIDADES

Todos as codificações e testes estruturais foram realizados com êxito, nessa subseção são apresentadas somente as GUIs desenvolvidas, modificações realizadas frente ao projeto e os respectivos testes de unidades e seus resultados.

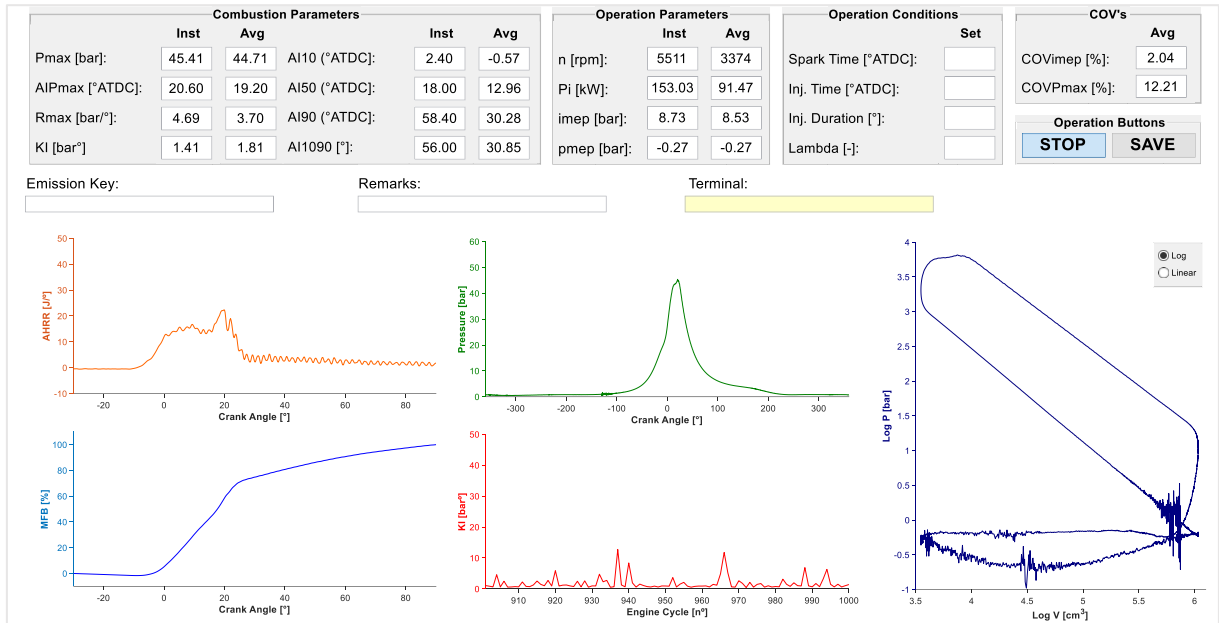
4.4.1 Painel de Controle

A GUI do Painel de Controle desenvolvida está apresentada na Figura 13 da página 61. Nela os indicadores foram distribuídos em painéis de acordo com sua área de análise. Além disso, foram adicionadas caixas de texto para entradas de informações adicionais referente ao ensaio e uma caixa de texto (“Terminal”) para saída de informações a respeito do funcionamento do software. Apesar da figura não apresentar a aba de menus, esses estão situados acima dos painéis de indicadores. O menu “Menu” concede acesso aos componentes de parametrização enquanto o menu “Results” concede acesso ao Repositório de Experimentos.

Em razão de problemas de implementação, o filtro passa-baixas foi substituído pelo filtro de Hodrick-Prescott de grau de suavização 100. Esse filtro substituo foi escolhido por ser próprio para captação de tendência em pacote de dados cíclicos e ser de fácil implementação via MATLAB (HODRICK; PRESCOTT, 1997). A comunicação implementada é compatível com as placas de aquisição das seguintes fabricantes: *Analog Devices*, *Data Translation*, *Digilent Analog Discovery*, *Measurement Computing*, e *National Instruments*. Além disso, foi constatado que há linguagem aberta para desenvolvimento de extensões de compatibilidade com outros

produtos e fabricantes. Esses fatores possibilitam a operação do software em uma grande gama de configurações experimentais.

Figura 13 - GUI do Painel de Controle desenvolvida.



O primeiro teste funcional verificou se a GUI do Painel de Controle atende a complexidade de *layout* especificada na fase de requisitos. Os resultados obtidos tanto para as complexidades específicas quanto para LC estão listados na Tabela 2 abaixo. O valor estimado de *LC* obtido foi de 37%, que além de estar dentro da especificação, é também menos complexo do que aplicativos de acesso remoto de área de trabalho da Microsoft (43,1%) e da Intelliadmin (56,7%) (ALEMERIEN, 2014). Desta forma, a GUI do Painel de Controle mostrou-se adequada para o monitoramento.

Tabela 2 - Medidas de complexidade da GUI do Painel de Controle.

Complexidade	Medida
Total de Alinhamento (TAC)	46,0%
Total de Balanço (TBC)	40,2%
Densidade (DC)	56,1%
Tamanho (SC)	17,5%
Agrupamento (GT)	25,4%
<i>Layout</i> (LC)	37,0%

O segundo teste funcional verificou se os métodos de referenciamento do ciclo e do referenciamento da pressão implementados atendem a suas respectivas especificações para erro absoluto. Essa verificação foi realizada comparando-se o ângulo e a magnitude da pressão máxima com os resultados providos pelo software comercial de referência. O sinal de pressão utilizado foi obtido pela conversão dos dados de pressão em dados filtrados de tensão, utilizando as informações do manual do usuário (AVL, 2014) e da configuração do software. Para avaliar referenciamento do ciclo, o sinal foi deslocado $\theta_{offset} = 30^\circ$ para simular outra posição de gatilho. Os resultados obtidos ao longo dos 200 ciclos e 14 casos estão listados no Quadro 16 abaixo.

Quadro 16 - Resultados de diferença absoluta dos métodos de referenciamento do ciclo e do referenciamento da pressão.

Caso	Diferença Absoluto da P_{max}							
	Máx (bar)	Mín (bar)	Média (bar)	σ (bar)	Máx (%)	Mín (%)	Média (%)	σ (%)
01	0,038	0,019	0,028	0,004	0,142	0,053	0,097	0,017
02	0,018	3E-05	0,006	0,004	0,074	5E-05	0,016	0,014
03	0,018	2E-04	0,009	0,004	0,030	4E-04	0,010	0,008
04	0,027	0,003	0,015	0,004	0,035	2E-04	0,014	0,007
05	0,042	0,017	0,028	0,004	0,158	0,044	0,097	0,019
06	0,050	0,019	0,034	0,006	0,182	0,050	0,111	0,026
07	0,023	3E-05	0,010	0,005	0,116	5E-04	0,036	0,022
08	0,029	0,004	0,014	0,005	0,065	5E-04	0,023	0,013
09	0,037	0,005	0,020	0,006	0,056	5E-04	0,023	0,010
10	0,047	0,005	0,028	0,007	0,170	0,010	0,087	0,031
11	0,085	0,020	0,051	0,012	0,307	0,045	0,172	0,048
12	0,044	2E-04	0,016	0,010	0,216	0,001	0,057	0,041
13	0,048	1E-04	0,022	0,011	0,116	6E-04	0,043	0,026
14	0,055	0,001	0,023	0,010	0,078	7E-04	0,026	0,017

Os resultados de diferença absoluta do referenciamento de pressão mostraram que o método atende a especificação com uma diferença máxima de 0,085 bar (cerca de 0,307 %) e uma diferença média de $(0,051 \pm 0,012)$ bar (cerca de $(0,172 \pm 0,048)$ %) no pior caso (apontado em negrito). A diferença absoluta do ângulo da pressão máxima mostrou-se nula em todos os casos, atendendo a especificação de faseamento angular.

O terceiro teste funcional verificou se o método de estimativa do coeficiente politrópico implementado atende a sua especificação para erro relativo absoluto. Essa

verificação foi realizada comparando-se com o valor obtido pelo modelo de razão dos calores específicos apresentado no Anexo 2 – Modelo de Razão dos Calores Específicos (CEVIZ; KAYMAZ, 2005). Considerando que o coeficiente politrópico é constante e tende ao valor da razão dos calores específicos em um intervalo angular quase-adiabático (SUN et al., 2017), o modelo foi avaliado para a temperatura de parede do cilindro. Como a temperatura de parede do cilindro não foi medida durante os ensaios utilizados como referência, foi utilizado um valor de 360 K tal como utilizado em cálculos de transferência de calor presentes na literatura (COLLIN R. FERGUSON, 2016). Os resultados de diferença absoluta obtidas estão listados no Quadro 17 abaixo. Esses resultados mostraram que o método atende a especificação com diferença absoluta máxima de 0,488% e um diferença absoluta média de $(0,137 \pm 0,109)$ % no pior caso (destacado em negrito).

Quadro 17 - Resultados de diferença absoluta do método de estimativa do coeficiente politrópico.

Casos	Diferença Absoluta do γ (%)			
	Máx	Mín	Média	σ
01	0,228	1E-03	0,056	0,041
02	0,488	4E-04	0,137	0,109
03	0,351	3E-04	0,101	0,074
04	0,288	2E-03	0,09	0,06
05	0,285	7E-06	0,067	0,05
06	0,224	8E-04	0,055	0,042
07	0,386	4E-03	0,128	0,093
08	0,336	2E-04	0,098	0,072
09	0,259	2E-03	0,079	0,056
10	0,240	1E-03	0,061	0,046
11	0,401	1E-03	0,093	0,073
12	0,444	2E-05	0,113	0,088
13	0,229	6E-05	0,073	0,054
14	0,278	1E-03	0,072	0,054

O quarto teste funcional verificou se o tempo de execução da etapa de “Processamento e Exibição” do algoritmo global da unidade funcional “Operação do Software” atende a sua especificação. Esse teste foi realizado efetuando-se três testes de 100 mil iterações de execução seguidas. Em virtude dos problemas associados com a aquisição e o processamento de dados com resoluções angulares pequenas em rotações acima de 9.000 rpm (BRUNT; LUCAS, 1991; RANDOLPH, 1994), foi utilizado a resolução angular recomendada de 1° nos testes (RANDOLPH,

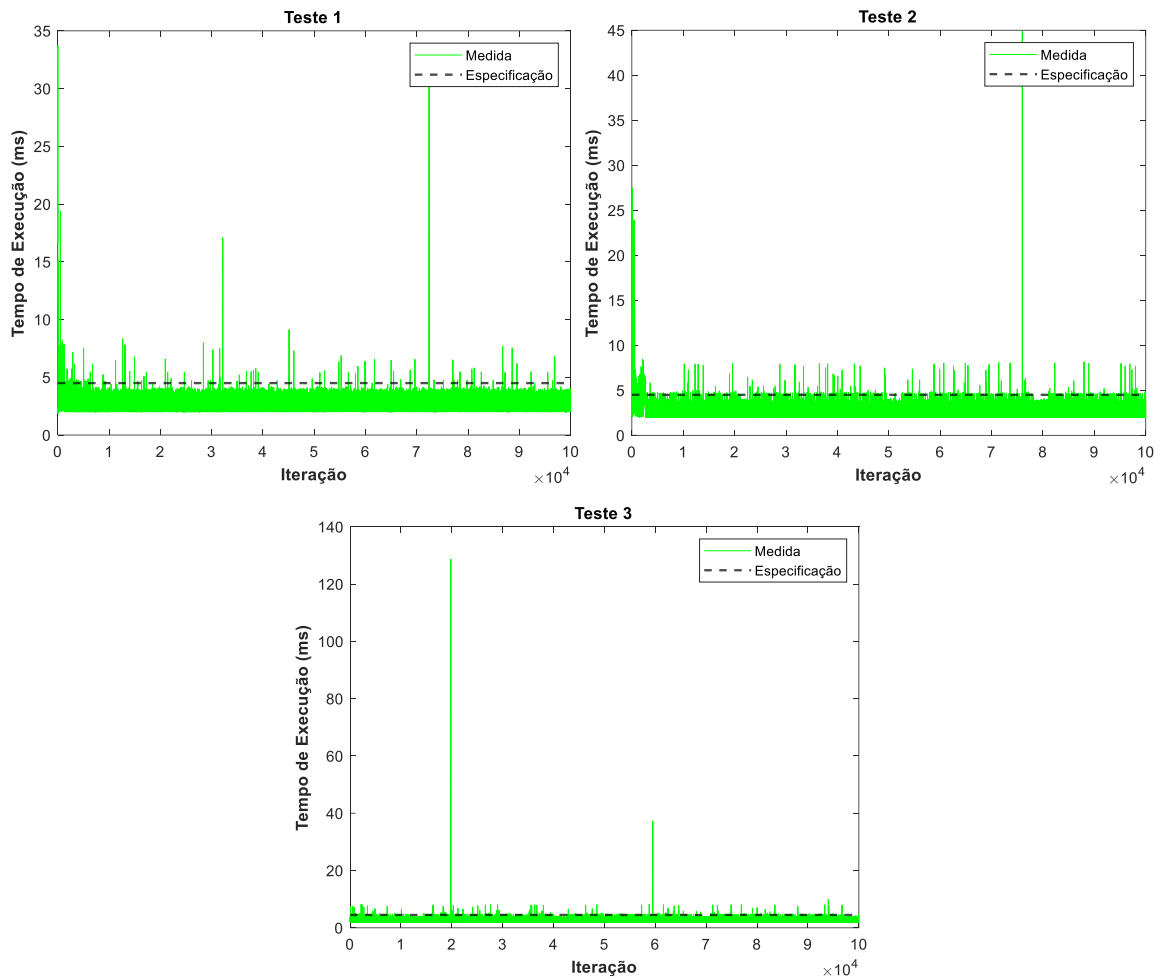
1994). Entretanto, essa resolução angular recomendada não é adequada para detecção e análise da detonação (ROGERS, 2010). Contudo, estudos mostraram que essa questão pode ser resolvida através da implementação de métodos de aquisição e processamento com resolução angular variável (BRUNT et al., 2000). Os resultados de tempo de execução obtidos estão listados no Quadro 18.

Quadro 18 - Resultados de tempo de execução para etapa de processamento e exibição do loop de aquisição.

Teste	Tempo de Execução (ms)			
	Máx	Mín	Média	σ
01	33,922	1,892	2,188	0,352
02	44,862	1,931	2,312	0,601
03	128,628	1,916	2,286	0,710

Esses resultados mostraram que, em média, o tempo de execução é cerca de metade do tempo especificado, sendo de $(2,286 \pm 0,710)$ ms no pior teste (destacado em negrito). Entretanto, os valores máximos obtidos extrapolam subitamente o valor da especificação. Para avaliar o impacto disso no processamento e exibição dos resultados em tempo real, observou-se o comportamento do tempo de execução ao longo de cada teste. Através do comportamento do tempo de execução para cada teste plotado na Figura 14 da página 65, constatou-se que os picos de tempo de execução ocorrem extremamente espaçados um dos outros, atrasando localmente a operação em tempo real. Como o tempo de execução médio obtido é significativamente menor do que o tempo necessário para acompanhar os ciclos, investigou-se o tempo necessário para o tempo médio compensar o atraso gerado pelo tempo de execução máximo no pior teste. Essa investigação constatou que o algoritmo implementado levou cerca de 60 ciclos para compensar o atraso, correspondente a 250 ms. Considerando que o ser humano leva em média 300 ms para perceber uma imagem após sua exibição (ISIK et al., 2020), constatou-se que em média o ser humano não é capaz de perceber esse atraso. Deste modo, considerando que a especificação foi realizada com o objetivo de possibilitar o monitoramento do experimento em tempo real, concluiu-se que a especificação foi adequadamente atendida.

Figura 14 - Comportamento do tempo de execução ao longo das 100 mil iterações de execução em cada teste.



Por fim, vale destacar que o tempo de execução é dependente do hardware utilizado. Portanto, o tempo de execução foi validado para a configuração utilizada.

4.4.2 Repositório de Experimentos

A GUI desenvolvida para o Painel de Controle está apresentada na Figura 15 da página 66. Nela, pode se observar a tabela de pacote de dados dos experimentos salvos centralizada com os botões auxiliares de exportação acima. Foram adicionados botões para gerenciamento dos experimentos salvos e onde eles devem ser exportados.

Nesse componente foi realizado um teste funcional para verificar se os experimentos salvos são corretamente exibidos, identificados e exportados. Esse teste foi realizado inserindo um conjunto gerado de matrizes de pacote de dados no

BDRE. Após a inserção, a GUI do componente foi iniciada onde verificou-se se os dados são exibidos de acordo com o especificado no projeto detalhado. Depois dessa verificação, foi solicitada a exportação de todos os pacotes de dados salvos. A GUI preenchida com os pacotes de dados inseridos é mostrada pela Figura 16 abaixo. Os dados inseridos foram exibidos em conformidade com o projeto do componente, sendo possível visualizar e identificar os experimentos salvos. A Figura 17 da página 68 apresenta o resultado da exportação dos pacotes de dados salvos. O processo de exportação foi realizado em conformidade com o projeto da unidade funcional, gerando corretamente as pastas, subpastas e arquivos especificados.

Figura 15 - GUI do Repositório de Experimentos desenvolvida.

Test N°	MP	Test Date	imep [bar]	pmep [bar]	Pmax [bar]	AIPmax [°ATDC]	Rmax [bar/°]	kc	ke	AI10 [°ATDC]	AI50 [°ATDC]	AI90 [°ATDC]	AI1090
---------	----	-----------	------------	------------	------------	----------------	--------------	----	----	--------------	--------------	--------------	--------

Figura 16 - Resultado da inserção de pacotes de dados no BDRE.

Test N°	MP	Test Date	imep [bar]	pmep [bar]	Pmax [bar]	AIPmax [°ATDC]	Rmax [bar/°]	kc	ke	AI10 [°ATDC]	AI50 [°ATDC]	AI90 [°ATDC]	AI1090
P08	001	2019-07-31 18:14:36	-1.0593	-0.59737	22.249	-0.91000	18.743	1.5597 + ...	1.4065 - ...	NaN	NaN	NaN	NaN
P08	001	2019-07-31 18:16:00	-1.0411	-0.57949	22.769	-0.84700	18.945	1.4179 + ...	1.5233 - ...	NaN	NaN	NaN	NaN
P08	001	2019-07-31 18:16:54	-1.0375	-0.57299	22.990	-0.79900	18.631	1.3739 + ...	1.4972 - ...	NaN	NaN	NaN	NaN
P08	001	2019-07-31 18:17:22	-1.0399	-0.57102	23.101	-0.97000	18.564	1.3238 + ...	1.4322 - ...	NaN	NaN	NaN	NaN
P08	001	2019-07-31 18:19:20	-1.0361	-0.56019	23.268	-0.67600	18.234	1.3995 + ...	1.4446 - ...	NaN	NaN	NaN	NaN
P08	001	2019-07-31 18:20:17	-1.0323	-0.55585	23.282	-0.67000	18.526	1.4441 + ...	1.5854 - ...	NaN	NaN	NaN	NaN
P08	001	2019-07-31 18:21:21	0.38840	-0.30639	33.708	-11.263	18.332	1.4066 + ...	1.3587 - ...	NaN	NaN	NaN	NaN
P08	001	2019-07-31 18:22:40	0.049171	-0.35583	31.014	-0.63600	18.511	1.4323 + ...	1.4625 - ...	NaN	NaN	NaN	NaN

Figura 17 - Resultado da exportação.

■ P08_001_001_2019_07_31_18_14_36
■ P08_001_002_2019_07_31_18_16_00
■ P08_001_003_2019_07_31_18_16_54
■ Tests 2019-07-31 {
■ P08_001_004_2019_07_31_18_17_22
■ P08_001_005_2019_07_31_18_19_20
■ P08_001_006_2019_07_31_18_20_17
■ P08_001_007_2019_07_31_18_21_21

■ P08_001_004_2019_07_31_18_17_22 Average Cycles Results.xlsx
■ P08_001_004_2019_07_31_18_17_22 Cycles Results.xlsx
■ P08_001_004_2019_07_31_18_17_22 Raw Pressure Data.xlsx
■ P08_001_004_2019_07_31_18_17_22 Test Log.rtf

(1) Registro do Ensaio
 (2) Dados de Pressão Bruto
 (3) Resultados por Ciclo
 (4) Resultados Médios dos Ciclos

4.4.3 Cadastro de Experimentos

A GUI desenvolvida para o Cadastro de Experimentos está apresentada na Figura 18 da página 68. Nela, os parâmetros a serem coletados foram divididos de acordo com a sua área de atuação. Visando implementações futuras, parâmetros extras para o processamento de dados e exibição foram adicionados.

4.4.4 Configuração do DAQ

A GUI desenvolvida para a Configuração do DAQ está apresentada na Figura 19 da página 68. Nela os parâmetros do DAQ foram divididos de acordo com seus respectivos subsistemas. Durante o desenvolvimento, observou-se a necessidade da adição de um botão (“Refresh”) para detectar dispositivos conectados após a abertura

da GUI. Ainda, visando implementações futuras, foi adicionada uma opção inativa para o referenciamento angular.

Figura 18 - GUI do Cadastro de Experimentos desenvolvida.

Test Register

Project N°:

Test N°:

MP:

Operator:

Contact:

Test Objectives:

- 1)
- 2)
- 3)
- 4)

Engine Design

Engine:

N° Cylinders:

Injection Mechanism:

Cooling Mechanism:

Test Conditions

Atmosphere Pressure [bar]:

Oil Pressure [bar]:

Room Temperature [°C]:

Oil Temperature [°C]:

Coolant Temperature [°C]:

Humidity [%]:

Fuel and Consumption

Fuel Measurement System:

Fuel Type:

Geometrical Parameters

Cylinder Bore [mm]:

Conneting Rod Length [mm]:

Stroke [mm]:

Compression Ratio [-]:

N° Revolutions/Power Stroke [-]:

Data Processing and Display

Data Pack Size [cycles]:

Display Every [cycles]:

Knock Intensity Superior Limit [bar°]:

Valve Parameters

Inlet Valve		Exhaust Valve	
IVO [°]:	<input type="text" value="695"/>	EVO [°]:	<input type="text" value="495"/>
IVC [°]:	<input type="text" value="210"/>	EVC [°]:	<input type="text" value="720"/>
IVL [mm]:	<input type="text" value="8.5"/>	EVL [mm]:	<input type="text" value="7.3"/>

Figura 19 - GUI da Configuração do DAQ desenvolvida.

Device:

Cylinder Pressure

Channel: 1/Gain [bar/V]:

Ter. Cfg: Peg Gamma:

Angular Referencing

Encoder

Type: Freq Port:

Trigger PFI: Freq PFI:

Clock PFI: Freq. Signal:

Pulses/Rev: TDC Offset [°]:

Toothed Wheel

Type: N° of Teeth:

Channel: N° Miss. T:

Ter. Cfg: Divis./Rev:

Ref. Type: TDC O. [°AMT]:

4.5 FASE DE TESTE DE INTEGRAÇÃO

O teste de integração foi realizado ao passo que as unidades e os componentes foram codificados e integrados ao Painel de Controle, garantindo que os fluxos de dados ocorram da forma e com a estrutura adequada.

Ao final do teste de integração da última unidade e do último componente, todos os requisitos de software foram atendidos com valores nominais adequados frente a especificação realizada na modelagem de requisitos, tal como é mostrado na Tabela 3 abaixo.

Tabela 3 - Comparação dos valores nominais obtidos e as especificações dos requisitos do software.

N°	Requisito do Software	Esp.	Nominal
1	Tempo de execução (ms)	$\leq 4,5$	$2,286 \pm 0,710$
2	N° de GUIs para parametrização	≥ 1	2
3	Erro absoluto do faseamento angular (grau)	$\leq 0,1$	0
4	Erro absoluto do referenciamento de pressão (bar)	$\leq 0,1$	$0,051 \pm 0,012$
5	Erro relativo absoluto do valor do coeficiente politrópico estimado	$\leq 1\%$	$0,137 \pm 0,109$
6	Complexidade de <i>Layout</i> LC (%)	≤ 50	37%
7	N° de funções de armazenamento	1	1
8	N° de GUIs de acesso e visualização dos experimentos salvos	1	1
9	N° de sistemas de identificação de experimentos	1	1
10	N° de formatos de exportação	≥ 1	2

4.6 FASE DE TESTE DE SISTEMA

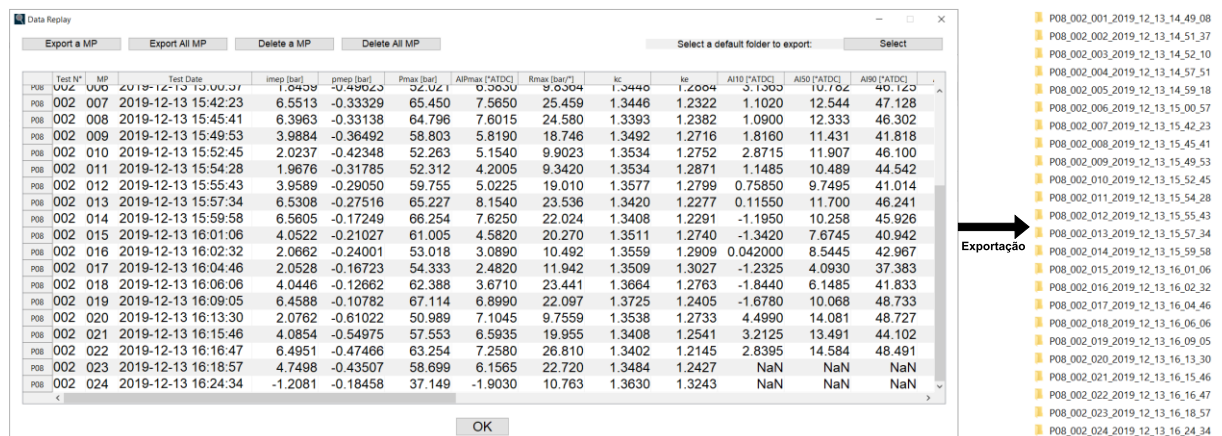
O teste de aceitação se deu início com a abertura do software, parametrização do experimento e do DAQ. Após essa etapa inicial, o motor foi ligado e a aquisição de dados iniciada. Ao todo, foram adquiridos 27 pacotes de dados, onde os primeiros 7 foram salvos durante o aquecimento do motor. Após o aquecimento, deu-se início ao mapeamento planejado. O Quadro 19 da página 70 traz o resumo da planilha do teste de mapeamento realizado. Os pacotes de dados salvos durante esse ensaio estão apresentados à esquerda da Figura 20 da página 70, enquanto os arquivos exportados estão à direita.

Quadro 19 - Resumo da planilha do ensaio realizado no teste de aceitação.

Data: 13/12/2019		Combustível: Diesel S10		P. Atm:	1,015 bar		
Motor: Ricardo Proteus				T. Amb:	29°C		
Operador: Valdemir de Lima Jr.				Umid:	36%		
Objetivo do ensaio: testar o software desenvolvido							
PM	N (rpm)	IMEPn (bar)	λ (-)	TA (°C)	TE (°C)	TO (°C)	SPM
01	1.800	2	3,2	-	-	-	8
02	1.800	6,5	1,6	33,5	158,9	69,5	11
03	1.800	4	2,4	36	159	73	12
04	1.800	2	4	38	160	74	13
05	1.600	2	3,4	39,5	160	75,7	14
06	1.600	4	2,4	40,5	160,2	76,5	15
07	1.600	6,5	1,5	41,9	163,3	77,5	16
08	1.400	6,5	1,5	41,9	160,4	77,8	17
09	1.400	4	2,3	41,1	160,5	77,5	18
10	1.400	2	3,4	41,2	160,5	78,2	19
11	1.200	2	3,8	42,7	160,6	77,5	20
12	1.200	4	2,4	43,6	160,5	77,8	21
13	1.200	6,5	1,5	44,8	160,5	76,3	22
14	2.000	2	4	42,6	160,5	77,8	23
15	2000	4	2,4	42,4	160,5	78,7	24
16	2000	6,5	1,6	42,2	160,5	79	25

PM: Ponto de Medida
 SPM: Ponto de Medida do Software
 TA: Temperatura de Admissão
 TE: Temperatura de Exaustão
 TO: Temperatura do Óleo

Figura 20 - Produto do ensaio de aceitação realizado.



Durante o experimento, o software propiciou um adequado monitoramento do desempenho do motor em tempo real, suprimindo a necessidade de monitoramento do usuário e a necessidade de adquirir pacotes de dados do ensaio realizado. Entretanto,

observou-se um leve atraso na exibição dos resultados nas últimas medições a 2000 rpm. Contudo, como a resolução angular impacta significativamente no tempo de execução, esse problema pode ser resolvido sem alteração do hardware do computador utilizado, apenas alterando a resolução angular.

4.7 REQUISITOS MÍNIMOS DO SISTEMA

Segundo a arquitetura desenvolvida do software, a aquisição de dados ocorre através da comunicação com a placa de aquisição de dados por meio do seu respectivo *driver*. Uma vez que dados de tensão são adquiridos ao passo que pulsos coordenam o início e a execução da amostragem, não importa para o software que instrumento é utilizado para medir a variação de pressão e que instrumento é utilizado para gerar os pulsos, desde que, as amostras adquiridas sejam uma medida de variação de pressão espaçadas por uma variação angular regular conhecida. Portanto, esses requisitos de hardware podem ser alterados, uma vez que as diretrizes descritas acima, sejam obedecidas. A placa de aquisição de dados, por sua vez, deve ser compatível com a biblioteca *Data Acquisition Toolbox* da biblioteca de funções MATLAB *Runtime* utilizada no desenvolvimento. Uma vez que o software foi desenvolvido na interface de desenvolvimento integrado (IDE) MATLAB R2018b, as placas de aquisição de dados compatíveis podem ser verificadas na tabela de requisitos de sistema para suporte de hardware, encontrado no endereço eletrônico: <https://www.mathworks.com/hardware-support/system-requirements.html> (acessado em 30/01/2021 às 14:36). Nessa tabela, na linha correspondente ao *Data Acquisition Toolbox*, as placas de aquisição de dados compatíveis podem ser verificadas, acessando o endereço eletrônico respectivo a sua fabricante, disposta na coluna correspondente a versão R2018b do MATLAB. Vale evidenciar que as placas de aquisição de dados ainda devem permitir a entrada de sinais de tensão, sinais digitais e possuir um contador de frequência.

Além desses requisitos de hardware descritos, também é necessário um computador pessoal (PC) que execute o software de forma adequada. O computador utilizado para executar o software deve possuir características de hardware e de software, compatíveis com o sistema e com o software desenvolvido. No que tange aos requisitos de hardware do computador, é essencialmente necessário que o computador possua um barramento de comunicação compatível com a placa de

aquisição de dados. Adicionalmente, também é preciso considerar as configurações de hardware mínima para executar o software. Considerando os requisitos de sistema do compilador (MATHWORKS, 2018), é recomendado o uso de processadores com quatro núcleos que suportam instruções AVX2, além do uso de 8 GB de memória RAM. Além desses requisitos, o computador deve possuir espaço de armazenamento para comportar o software desenvolvido, a biblioteca de funções MATLAB *Runtime* 9.5 (instalada junto com o software) e os arquivos gerados pelo software. O software desenvolvido ocupa um espaço de 550 MB, enquanto o MATLAB *Runtime* 9.5 ocupada 1,8 GB. Assim, considerando um espaço para o armazenamento de arquivos, é necessário, pelo menos, 4 GB de espaço livre para armazenamento dos arquivos para a execução do software. Vale destacar que após a instalação do software, é possível desinstalar a biblioteca MATLAB *Runtime* 9.5 e instalar outra compatível com o *driver* e a placa de aquisição de dados desejados. Além dos requisitos de hardware necessários para o computador operar o software no sistema, também existem alguns requisitos de software. O primeiro requisito, mencionado aqui várias vezes, é o *driver* para a comunicação com a placa de aquisição de dados. Em alguns dispositivos, o *driver* é instalado automaticamente ao conectar o dispositivo ao computador, entretanto, em outros dispositivos, como os da *National Instruments*, é preciso instalá-los por conta própria. Nesses casos, a compatibilidade do *driver* com a placa de aquisição de dados pode ser verificada diretamente na documentação do *driver*. Por exemplo, no caso do NI DAQMX 18.1 utilizado na validação do software, pode-se verificar a compatibilidade com a placa de aquisição de dados NI PCI-6024E na documentação encontrada no endereço eletrônico: ni.com/pdf/manuals/374768w.html (acessado 30/01/2021 às 15:54). Além do *driver*, deve-se considerar a compatibilidade da compilação do código com as arquiteturas e sistemas operacionais. Nesse sentido, com base na compilação do código, o software desenvolvido é executável apenas em arquiteturas 64 bits e com os seguintes sistemas operacionais:

- *Windows* 10;
- *Windows* 7 a partir do *Service Pack* 1
- *Windows Server* 2016;
- *Windows Server* 2012 R2;
- *Windows Server* 2012.

Diante desse contexto, é evidente que o computador utilizado no ensaio de validação do software, é inferior ao recomendado, uma vez que ele possui um processador de 2 núcleos que não suporta instruções AVX2 e 6 GB de memória RAM. Fatores que podem e provavelmente são, os responsáveis pelas observadas falhas de desempenho do software. Entretanto, é importante informar que a seleção desse computador, se decorreu apenas em função da compatibilidade com o barramento PCI da placa de aquisição de dados. O barramento PCI, criado em 1992 (PCI SPECIAL INTEREST GROUP, 1998), se tornou obsoleto após a criação do PCI Express em 2003 (MAYHEW; KRISHNAN, 2003), deste modo, sendo difícil de encontrar hoje em dia, placas mãe sendo fabricadas com tal barramento.

Com base na essência de cada requisito mínimo de hardware do sistema discutido anteriormente, foi elaborado o Quadro 20 apresentado na página 74, onde são apresentados os requisitos de acordo com sua essência, sua destinação no software desenvolvido, os dispositivos usuais utilizados para atender cada requisito, e um exemplo de sistema operável com o software. O exemplo de sistema foi projetado considerando o sistema utilizado na validação, mas também, sugerindo uma placa de aquisição de dados não obsoleta, a NI 6351. Os requisitos de hardware e software do computador pessoal (PC) para a execução do software, por sua vez, foram estruturados e estão apresentados no Quadro 21 da página 74. Para estruturar o computador pessoal sugerido nele, considerou-se tanto o sistema utilizado na validação, quando as peças disponíveis no mercado. Uma vez que o barramento PCI está obsoleto, foi difícil encontrar uma placa mãe com um barramento desse tipo. Por esse motivo, a placa mãe sugerida possui um significativo custo comparado aos outros componentes. Deste modo, no caso do uso da NI 6351, pode-se substituir a placa mãe por uma de menor custo, diminuindo assim, os custos de instrumentação. Vale lembrar que além desses requisitos listados, também é necessário o motor de combustão interna a ser ensaiado e no caso de um transdutor piezoelétrico de pressão, também é necessário o uso de um condicionador de sinal. Adicionalmente, o uso da placa de aquisição de dados NI PCI-6024E, também exige o uso de um bloco de conectores NI BNC-2110 para a transmissão dos sinais até a placa de aquisição de dados.

Quadro 20 - Requisitos mínimos de hardware do sistema.

Requisito	Destinação	Dispositivo usual	Exemplo
Fonte de pulsos de disparo	Amostragem com base na variação angular regular	Decodificador angular incremental	Dynapar B58N
Fonte de pulsos de referência	Iniciar a aquisição (Gatilho)		
Fonte de sinal de tensão	Sinal de variação da pressão do cilindro	Transdutor piezoelétrico de pressão	AVL GH14D
Amostrador de dados	Realizar a amostragem dos dados de pressão do cilindro com base na variação angular regular	Placa de aquisição de dados	NI 6351 ou NI PCI-6024
Interface humano-computador (HCI)	Adquirir, processar e exibir dados e resultados	Computador pessoal (PC)	Apresentado no Quadro 21

Quadro 21 - Requisitos mínimos de hardware e software do computador.

Requisito	Recomendação	Sugerido
<i>Hardware</i>		
Placa-mãe	Além de ter de ser compatível com os componentes do PC, também deve ser compatível com o barramento da placa de aquisição de dados	Asus Prime H310M-C/RS 2.0
Processador	Qualquer processador Intel ou AMD de arquitetura 64 bits com quatro núcleos e que suporte instruções do tipo AVX2	Intel® Core™ i5-7500T
Memória RAM	8 GB	Hyperx Hx424C15Fb2 8 GB
Armazenamento	4 GB de espaço livre, o uso de SSD é recomendável mas não necessário	HDD 1 TB Seagate ST1000DM010
Gráfico	Não é necessário placa gráfica, mas é recomendável	Não sugerido
<i>Software</i>		
Sistema operacional	<i>Windows 10</i> ou <i>Windows 7</i> a partir do <i>Service Pack 1</i> de arquitetura 64 bits	<i>Windows 7 Home Basic</i> x64
<i>Driver</i>	Compatível com o sistema operacional e com a placa de aquisição de dados	NI DAQmx 18.1

4.8 SÍNTESE

O projeto elaborado para o software foi implementado com sucesso, uma vez que os resultados obtidos na etapa de verificação, atendem a todas as especificações para os requisitos do software. Além disso, o software também atende a todos os desejos do usuário levantados na modelagem de requisitos, visto que na etapa de validação, o software mostrou-se capaz de cumprir com as necessidades do usuário e aos requisitos de operacionalidade do software em tempo real. Entretanto, vale

lembrar que durante o experimento de validação, foram observados atrasos na exibição dos resultados na velocidade de rotação máxima do motor. Mas como fora visto na subseção Requisitos Mínimos do Sistema da página 71, o computador utilizado possui uma configuração inferior a recomendada. Fator que pode e provavelmente é, o determinante por essas falhas.

A arquitetura do software desenvolvida, permite ao usuário uma grande liberdade na elaboração do sistema, visto que ela permite o usuário a escolher a estrutura de instrumentos utilizados, desde que os dados sejam amostrados da forma requerida pelo software. Essa característica permite o software a operar com diversas tecnologias alternativas, como o uso de um sistema sem decodificador angular incremental (ARONIS et al., 2017), reconstrução da pressão do cilindro por meio da velocidade de rotação instantânea do motor (MORO; CAVINA; PONTI, 2002), e o uso de sensores de pressão de baixo custo acoplados no sistema de combustão do motor (FREY, 2008). Entretanto, para ser operável com essas tecnologias, faz-se necessário o desenvolvimento de um módulo externo que transforme os sinais oriundos dos instrumentos utilizados, para uma forma que atenda aos requisitos mínimos do software. Essa necessidade de desenvolvimento de um módulo externo, dificulta a aplicação direta do software desenvolvido. Entretanto, em sistemas convencionais, o software tem aplicação direta, o que faz com que o software seja altamente aplicável, uma vez que ele permite alterações na configuração do sistema, diferentemente dos softwares disponíveis no mercado.

5 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

Nessa seção são apresentadas as considerações finais do trabalho. Na subseção Conclusão, é apresentado um apanhado geral sobre o trabalho desenvolvido e a conclusão dele. Na subseção Trabalhos Futuros, são apresentadas recomendações para a continuidade desse trabalho, frente aos próximos problemas a serem resolvidos.

5.1 CONCLUSÃO

Diante da necessidade ambiental, social e econômica de significativos avanços tecnológicos para aprimoramento dos motores de combustão interna (MCIs), o uso da indicação de pressão para o diagnóstico da combustão na pesquisa e desenvolvimento (P&D) é imprescindível. Contudo, a falta de flexibilidade dos softwares de indicação comerciais em operar em sistemas simples, de baixo custo e/ou com limitada intervenção no MCI, inviabiliza a P&D em pequenas empresas, centros de pesquisa, oficinas, laboratórios e instituições de ensino. Frente a isso, a presente monografia buscou desenvolver um software de indicação para MCIs aplicável aos sistemas de indicação mais simples e de baixo custo.

Para isso, foram elencadas as necessidades essenciais de um software de indicação, considerando as limitações impostas pela falta de infraestrutura e os desejos do usuário. Essas necessidades foram transformadas em métricas na forma de requisitos de software, aos quais foram especificados intervalos de valores aceitáveis para o atendimento das necessidades. A partir dos requisitos de software, projetou-se a arquitetura do software e posteriormente seus componentes e unidades funcionais. O projeto desenvolvido foi implementado e o produto dessa implementação foi verificado com relação às especificações realizadas para os requisitos do software. No processo de verificação, o software mostrou-se atender a todas as especificações de requisitos de software, tendo como ressalvas:

- Erro nulo no faseamento angular, uma vez dada a correta referência de ângulo de deslocamento do ponto morto superior (θ_{offset});
- Erro absoluto de $(0,051 \pm 0,012)$ bar no referenciamento da pressão;
- Erro absoluto relativo de $(0,137 \pm 0,109)$ % na estimativa da razão entre os calores específicos.

Após a etapa de verificação, o software foi validado em um ensaio de bancada de mapeamento de motor. Nesse ensaio, o software foi capaz de possibilitar ao usuário monitorar e adquirir dados do experimento realizado. Portanto, com base na experiência do usuário durante o ensaio, o software provou atender todas as necessidades do usuário levantadas no início do projeto. Entretanto, durante o ensaio, foram observados atrasos na exibição dos resultados na interface gráfica do usuário. Contudo, como fora visto no levantamento de requisitos mínimos do sistema, a configuração utilizada no ensaio era inferior a recomendada para a operação do software. Fator que mostrou ser um responsável em potencial por essa falha no desempenho do software. Portanto, para aplicações em situações limites, como por exemplo, em condições próximas da ocorrência de detonação em motores SI, sugere-se que seja utilizado um computador com a configuração recomendada para uso do software, caso contrário, acidentes podem acontecer.

Além disso, a arquitetura do software permitiu a aplicação de uma ampla gama de tipos de instrumentos no sistema de indicação, uma vez que os dados sejam amostrados de acordo com a forma demandada pelo software. A baixa exigência instrumental e alta compatibilidade com as placas de aquisição de dados, aliada a essa característica especial da arquitetura, tornou o software desenvolvido altamente aplicável aos mais variados sistemas de indicação.

Finalmente, nesse trabalho um software de indicação foi desenvolvido e validado em laboratório com sucesso. Esse software mostrou-se ser uma poderosa ferramenta de auxílio à P&D de tecnologias para MCIs, que permitiu ao experimentador monitorar e adquirir dados durante o experimento. A grande flexibilidade e compatibilidade do software com os mais variados sistemas de indicação, tornaram-no altamente aplicável em sistemas simples de baixo custo com instrumentação limitada. Entretanto, a aplicabilidade do software mostrou-se ser dependente da condição do ensaio e da qualidade do computador utilizado. Toda via, o produto desse trabalho, com certeza mostrou-se ser ótima uma alternativa para a viabilização da P&D em pequenas empresas, centros de pesquisa, oficinas, laboratórios e instituições de ensino.

5.2 TRABALHOS FUTUROS

Essa subseção é imprescindível para elucidar as possíveis continuações desse trabalho, uma vez que esse é uma continuação do trabalho realizado anteriormente pelo Eng. André Nakaema Aronis em 2018 (ARONIS, 2018).

Com base nas tendências do mercado e das empresas de desenvolvimento identificadas no desenvolvimento desse trabalho, podem ser elencadas três grandes frentes de continuação desse trabalho.

A primeira frente, e talvez a mais cobiçada para a aplicação e controle dos novos modos de combustão de baixa temperatura, é o desenvolvimento de um sistema de indicação a bordo de veículos que seja capaz de comunicar-se com a unidade de controle do motor e controlar a combustão. Para isso, é imprescindível a redução do custo de instrumentação, principalmente da medição de pressão. Nesse sentido, há trabalhos na literatura que mostram o uso de sensores de pressão de baixo custo (da ordem de 20 a 10 dólares) acoplados no sistema de combustão (vela de centelha e vela incandescente) estão sendo empregados por montadoras para o controle da combustão (FREY, 2008).

A segunda frente, se refere a implementação de métodos de predição da detonação e das emissões através de redes neurais. Essa tecnologia tem sido desenvolvida para aplicação em ensaios de bancada, entretanto, o foco das desenvolvedoras é torná-la aplicável diretamente na malha de controle fechada do motor dentro do veículo, como forma de operar em condições de máxima eficiência (próximas a detonação) e com baixas emissões de GEE e poluentes.

A terceira frente, consiste no aprimoramento do atual software, melhorando seu desempenho, implementando novos métodos e desenvolvendo módulos para permitir operar com tecnologias de instrumentação não intrusivas ao MCI. Dentre essas tecnologias não intrusivas, destacam-se o uso da vibração ou da velocidade instantânea de rotação do motor para reconstrução da pressão do cilindro (MORO; CAVINA; PONTI, 2002), e o uso do sinal indutivo do sensor fase acoplado à roda dentada para gerar os pulsos de amostragem e gatilho (ARONIS et al., 2017).

REFERÊNCIAS

- ABRAM, C.; FOND, B.; BEYRAU, F. Temperature measurement techniques for gas and liquid flows using thermographic phosphor tracer particles. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 64, n. 1, p. 93--156, 2018.
- ALEMERIEN, K. A. **Metrics and Tools to Guide Design of Graphical User Interfaces**. Fargo: North Dakota State University, 2014.
- ALEMERIEN, K.; MAGEL, K. GUIEvaluator: A metric-tool for evaluating the complexity of Graphical User Interfaces. **Proceedings of the International Conference on Software Engineering and Knowledge Engineering, SEKE**, v. 2014-Janua, n. January, p. 13–18, 2014.
- AMBROSIO, S.; FERRARI, A.; GALLEANI, L. In-cylinder pressure-based direct techniques and time frequency analysis for combustion diagnostics in IC engines. **ENERGY CONVERSION AND MANAGEMENT**, v. 99, p. 299–312, 2015.
- ARONIS, A. N. et al. **Encoderless Data Acquisition System Applied to the Combustion Analysis of an Engine Operating on HCCI Combustion Mode**. SAE Technical Papers. **Anais...7 nov. 2017**Disponível em: <<http://papers.sae.org/2017-36-0427/>>
- ARONIS, A. N. **Sistema de Aquisição e Análise de Dados em Tempo Real Aplicado a Motores de Combustão Interna**Santa Maria, RS, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO/IEC IEEE 16326: Engenharia de Sistemas e de Software - Processos de Ciclo de Vida - Gerenciamento de Projeto**, , 2012.
- ATKINS, R. D. **An Introduction to Engine Testing and Development**. Warrendale: SAE International, 2009.
- AVL. **AVL IndiCom Mobile 2015 v2.7 - User's Guide**. Graz: AVL List GmbH, 2014.
- BAŠKOVIČ, U. Ž. et al. A new method for simultaneous determination of the TDC offset and the pressure offset in fired cylinders of an internal combustion engine. **Energies**, v. 10, n. 1, 2017.
- BASSHUYSEN, R. VAN; SCHÄFER, F. **Internal Combustion Engine Handbook**. Warrendale: SAE International, 2004.
- BENZ, M.; ONDER, C. H. Engine Emission Modeling Using a Mixed Physics and Regression. **Journal of Engineering of Gas Turbines and Power**, v. 132, n. April 2010, p. 1–11, 2010.
- BESSIERE, K. et al. Understanding Computer User Frustration: Measuring and Modeling the Disruption from Poor Designs. 2003.
- BRECQ, G.; LE CORRE, O. Modeling of in-cylinder pressure oscillations under knocking conditions: Introduction to pressure envelope curve. **SAE Technical Papers**,

v. 2005, n. 724, 2005.

BRUNT, M. F. J. et al. An improved approach to saving cylinder pressure data from steady-state dynamometer measurements. **SAE Technical Papers**, n. 724, 2000.

BRUNT, M. F. J.; EMTAGE, A. L. Evaluation of burn rate routines and analysis errors. **SAE Technical Papers**, n. 412, 1997.

BRUNT, M. F. J.; LUCAS, G. G. The effect of crank angle resolution on cylinder pressure analysis. **SAE Technical Papers**, 1991.

BRUNT, M. F. J.; PLATTS, K. C. Calculation of heat release in direct injection diesel engines. **SAE Technical Papers**, n. 724, 1999.

BRUNT, M. F. J.; POND, C. R. Evaluation of techniques for absolute cylinder pressure correction. **SAE Technical Papers**, n. 412, 1997.

BRUNT, M. F. J.; POND, C. R.; BIUNDO, J. Gasoline Engine Knock Analysis using Cylinder Pressure Data. **SAE Technical Paper Series**, p. 16, 1998.

BRUNT, M. F. J.; RAI, H.; EMTAGE, A. L. The Calculation of Heat Release Energy from Engine Cylinder Pressure Data. **SAE Technical Paper**, n. 1, p. 16, 1998.

BUENO, A. V.; VELÁSQUEZ, J. A.; MILANEZ, L. F. Internal Combustion Engine Indicating Measurements. In: **Applied Measurement Systems**. Rijeka: InTech, 2012.

CEVIZ, M. A. et al. Determination of cycle number for real in-cylinder pressure cycle analysis in internal combustion engines. **Energy**, v. 36, n. 5, p. 2465–2472, 2011.

CEVIZ, M. A.; KAYMAZ, I. Temperature and air-fuel ratio dependent specific heat ratio functions for lean burned and unburned mixture. **Energy Conversion and Management**, v. 46, n. 15–16, p. 2387–2404, 2005.

CHAPRA, S. C.; CANALE, R. P. **Métodos Numéricos para Engenharia**. 7^a ed. New York: McGraw-Hill Education, 2016.

CHIODI, M. **An Innovative 3D-CFD Approach towards Virtual Development of Internal Combustion Engines**. 1st. ed. Mörlenbach: Vieweg+Teubner, 2011.

COLLIN R. FERGUSON, A. T. K. **Internal Combustion Engines: Applied Thermosciences**. 3. ed. Chichester: John Wiley & Sons, Ltd, 2016.

DEY, K. Characterization and rejection of noise from pressure traces in a diesel engine. 2012.

DUNNE, J. A.; JACKSON, S. C.; HARTE, J. Greenhouse Effect. **Encyclopedia of Biodiversity: Second Edition**, v. 4, p. 18–32, 2013.

FREY, D. Robust Design Evolution and Impact of In-Cylinder Pressure Sensors to Combustion Control and Optimization : A Systems and Strategy Perspective . 2008.

HERNANDEZ, H. et al. **EU R&D Investment Scoreboard 2019**. Seville: Publications

Office of the European Union, 2019. Disponível em: <http://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC118983/eu_rd_scoreboard_2019_final_online.pdf>.

HERSHEY, A. E.; PATON, R. F. Flame temperatures in an internal combustion engine measured by spectral line reversal. **University of Illinois Bulletin**, v. 62, n. 262, p. 49, 1933.

HEYWOOD, J. B. **Internal Combustion Engines Fundamentals**. 2. ed. Kindle Edition: McGraw-Hill Education, 2018.

HODRICK, R. J.; PRESCOTT, E. C. Postwar U.S. Business Cycles: An Empirical Investigation. **Journal of Money, Credit and Banking**, v. 29, n. 1, p. 1, 1997.

ISIK, L. et al. The speed of human social interaction perception. **NeuroImage**, v. 215, n. February, p. 116844, 2020.

KALGHATGI, G. Is it really the end of internal combustion engines and petroleum in transport? **Applied Energy**, v. 225, n. February, p. 965–974, 2018.

LARS, E.; LARS, N. **Modeling and Control of Engines and Drivelines**. 1st. ed. Chichester: John Wiley & Sons, Ltd, 2014. v. 1

LEE, K.; YOON, M.; SUNWOO, M. A study on pegging methods for noisy cylinder pressure signal. **Control Engineering Practice**, v. 16, n. 8, p. 922–929, 2008.

MARR, M. A. et al. A fast response thermocouple for internal combustion engine surface temperature measurements. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v. 34, n. 2, p. 183–189, 2010.

MARTYR, A. J.; PLINT, M. A. **Engine Testing: Theory and Praticce**. Jordan Hill: Elsevier, 2007.

MATHWORKS. **System Requirements - Release 2018b**. Disponível em: <<https://www.mathworks.com/content/dam/mathworks/mathworks-dot-com/support/sysreq/files/system-requirements-release-2018b-windows.pdf>>. Acesso em: 30 jan. 2021.

MATSUDA, M.; MITSUNOBU, O. Temperature Measurement of Flame in a Gasoline Engine : 1st Report, Measurement of Average Temperature. **Bulletin of JSME**, v. 15, n. 86, p. 957–966, 1972.

MAURYA, R. K. Estimation of optimum number of cycles for combustion analysis using measured in-cylinder pressure signal in conventional CI engine. **Measurement: Journal of the International Measurement Confederation**, v. 94, p. 19–25, 2016.

MAURYA, R. K. **Characteristics and Control of Low Temperature Combustion Engines**. Cham: Springer International Publishing, 2018.

MAURYA, R. K. **Reciprocating Engine Combustion Diagnostics**. Cham: Springer International Publishing, 2019.

MAURYA, R. K.; PAL, D. D.; AGARWAL, A. K. Digital signal processing of cylinder pressure data for combustion diagnostics of HCCI engine. **Mechanical Systems and Signal Processing**, v. 36, n. 1, p. 95–109, 2013.

MAYHEW, D.; KRISHNAN, V. **PCI express and advanced switching: evolutionary path to building next generation interconnects**. 11th Symposium on High Performance Interconnects, 2003. Proceedings. **Anais...IEEE Comput. Soc**, 2003Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/1231473/>>

MERKER, G. P. et al. **Simulating Combustion**. Berlin, Heidelberg: Springer, 2006. v. 01

MERKER, G. P.; SCHWARZ, C.; TEICHMANN, R. **Combustion Engines Development**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2012. v. 53

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. RenovaBio: Nota explicativa sobre a proposta de criação da Política Nacional de Biocombustíveis. p. 1–138, 2016.

MORO, D.; CAVINA, N.; PONTI, F. In-Cylinder Pressure Reconstruction Based on Instantaneous Engine Speed Signal. **Engine Gas Turbines Power**, v. 124, n. January 2002, p. 220–225, 2002.

PAYRI, F. et al. Digital signal processing of in-cylinder pressure for combustion diagnosis of internal combustion engines. **Mechanical Systems and Signal Processing**, v. 24, n. 6, p. 1767–1784, 2010.

PCI SPECIAL INTEREST GROUP. **PCI Local Bus Specification**. Beaverton, Oregon, 1998. Disponível em: <<http://cdsweb.cern.ch/record/1247948>>. Acesso em: 30 jan. 2021

QUINTANA, S. H.; CASTAÑO-MESA, E. S.; BEDOYA, I. D. Experimental Study of the Polytropic Coefficient for an Air-Cooled, High-Compression-Ratio, Spark-Ignition Engine Fueled with Natural Gas, Biogas, and a Propane-Syngas Blend. **Energy and Fuels**, v. 32, n. 2, p. 2376–2384, 2018.

RANDOLPH, A. L. Cylinder-Pressure-Based Combustion Analysis in Race Engines. **SAE Technical Paper Series**, 1994.

REITZ, R. D. Grand Challenges in Engine and Automotive Engineering. **Frontiers in Mechanical Engineering**, v. 1, n. January, p. 1–3, 2015.

ROGERS, D. R. **Engine Combustion: Pressure Measurement and Analysis**. Warrendale: SAE International, 2010.

SHAHLARI, A. J.; GHANDHI, J. B. A comparison of engine knock metrics. **SAE Technical Papers**, v. 4, n. 1, 2012.

STICKEL, C.; EBNER, M.; HOLZINGER, A. The XAOS metric - Understanding visual complexity as measure of usability. **Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)**, v. 6389 LNCS, p. 278–290, 2010.

SUN, W. et al. A Cylinder Pressure Correction Method Based on Calculated Polytropic Exponent. **SAE Technical Papers**, v. 2017- Octob, 2017.

TAZEROUT, M.; LE CORRE, O.; ROUSSEAU, S. TDC determination in IC engines based on the thermodynamic analysis of the temperature-entropy diagram. **SAE Technical Papers**, n. 724, 1999.

THOMAS, S. et al. A Study on the Idle Combustion Stability of a CNG Powered Naturally Aspirated Engine Influence of Ignition Timing. **SAE Technical Paper Series**, p. 6, 2013.

THOR, M.; ANDERSSON, I.; MCKELVEY, T. Parameterized diesel engine heat release modeling for combustion phasing analysis. **SAE Technical Papers**, 2009.

TRAVER, M. L.; ATKINSON, R. J.; ATKINSON, C. M. Neural Network-Based Diesel Engine Emissions Prediction Using In-Cylinder Combustion Pressure. **SAE Technical Paper Series**, n. 724, 1999.

TURNES, S. R. **An Introduction to Combustion**. 2nd. ed. Singapore: McGraw Hill Series in Mechanical Engineering, 2001.

WANG, Z.; LIU, H.; REITZ, R. D. Knocking combustion in spark-ignition engines. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 61, p. 78–112, 2017.

WAZLAWICK, R. S. **Engenharia de Software Conceitos e Práticas**. Rio de Janeiro: Elsevier Editora Ltda, 2013.

WORRET, R. et al. Application of different cylinder pressure based knock detection methods in spark ignition engines. **SAE Technical Papers**, n. 724, 2002.

YANG, W.; YONG, C. Vibration Measurement for Combustion Phase Evaluation in a CI Engine. **IFAC-PapersOnLine**, v. 51, n. 31, p. 821–826, 2018.

ZHOU, L. et al. Experimental analysis of super-knock occurrence based on a spark ignition engine with high compression ratio. **Energy**, v. 165, p. 68–75, 2018.

ANEXO 1 – MODELO DE COMPLEXIDADE DE LAYOUT

Nessa seção é apresentado o modelo de complexidade de *layout* (LC) utilizado na etapa de verificação do software para avaliar a adequabilidade da interface gráfica do usuário (GUI) de monitoramento com relação aos requisitos do software. Esse modelo considera a influência de cinco métricas de projeto para medir a complexidade de *layout* (ALEMERIEN, 2014; ALEMERIEN; MAGEL, 2014).

1. ALINHAMENTO

A métrica de alinhamento mede o alinhamento vertical e horizontal de objetos em dois níveis: a nível local (alinhamento de grupo) e a nível global (alinhamento da tela). Esses dois alinhamentos são combinados para calcular a complexidade total de alinhamento da tela. O alinhamento de grupo (GA) é calculado para cada grupo de objetos através da relação:

$$GA = \frac{1}{2K} \sum_{i=1}^K (V_p + H_p) \quad (18)$$

H_p : Número de pontos de alinhamento horizontal o grupo

i_g : Grupo de objetos

K : Número de objetos no grupo

V_p : Número de pontos de alinhamento vertical o grupo

O intervalo de valores de GA é de [0,1]. A partir do alinhamento de grupo, é calculada a complexidade de alinhamento (AC) através da relação:

$$AC = \sum_{i_g=1}^m GA(i) \cdot \epsilon(i) \quad (19)$$

GA: Alinhamento de grupo

ϵ : Fração do número de objetos no grupo pelo total de objetos agrupados

i_g : Grupo de objetos

m : Número de grupos na tela

O alinhamento da tela (SA) é calculado através da relação:

$$SA = \frac{1}{2K_n} \sum_{i_n=1}^{K_n} (V_{pn} + H_{pn}) \quad (20)$$

H_{pn} : Número de pontos de alinhamento horizontal não agrupados

i_n : Objeto não agrupado

K_n : Número de objetos não agrupados

V_{pn} : Número de pontos de alinhamento vertical não agrupados

O intervalo de valores de SA é de [0,1]. Com os valores de AC e SA calculados, a complexidade de alinhamento total (TAC) é calculada através da relação:

$$TAC = AC \cdot w_{a,1} + SA \cdot w_{a,2} \quad (21)$$

$w_{a,1}$: Razão do número de objetos total agrupados e o número total de objetos na tela

$w_{a,2}$: Razão do número de objetos total não agrupados e o número total de objetos na tela

2. BALANÇO

A métrica de balanço leva em consideração medidas de equilíbrio do número de objetos e o tamanho desses objetos em relação a cada quarto de tela. Essas medidas de equilíbrio são utilizadas para calcular a complexidade de total de balanço. O equilíbrio do número de objetos, BQn , é calculado através da relação:

$$BQn = \frac{1}{6} \sum_{Q_k=1}^6 \frac{BQnq_1}{BQnq_2} \quad (22)$$

$BQnq_1$: Número de objetos no quadrante q_1

$BQnq_2$: Número de objetos no quadrante q_2

Q_k : Comparação de quadrantes

q_1 : Primeiro quadrante de referência

q_2 : Segundo quadrante de referência

O intervalo de valores do $BQni$ e $BQnj$ é [0,1] e o intervalo do BQn é [0,1], onde 0 significa totalmente desequilibrada e 1 significa totalmente equilibrada em termos de objeto. O equilíbrio do tamanho dos objetos, BQs , é calculado através:

$$BQs = \frac{1}{6} \sum_{Q_k=1}^6 \frac{BQsq_1}{BQsq_2} \quad (23)$$

$BQsq_1$: Soma dos tamanhos dos objetos no quadrante q_1

$BQsq_2$: Soma dos tamanhos dos objetos no quadrante q_2

Q_k : Comparação de quadrantes

q_1 : Primeiro quadrante de referência
 q_2 : Segundo quadrante de referência

O intervalo de valores de BQ_{si} e BQ_{sj} é $[0,1]$ e o intervalo de valores do BQ_s é $[0,1]$, onde 0 significa desequilibrada e 1 totalmente equilibrada em termos de tamanhos de objeto. Com os valores de BQ_n e BQ_s calculados, a complexidade total de balanço (TBC) é calculado através da relação:

$$TBC = 1 - \left(\frac{BQ_n}{2} + \frac{BQ_s}{2} \right) \quad (24)$$

BQ_n : Equilíbrio do número de objetos
 BQ_s : Equilíbrio do tamanho dos objetos

3. DENSIDADE

A métrica de densidade contabiliza a densidade local e global para calcular a complexidade de densidade. A densidade local (LDi_g) mede a densidade de cada grupo de objeto através da relação:

$$LDi_g = \frac{1}{A_{i_g}} \sum_{i_o=1}^K S_{i_o} \quad (25)$$

A_{i_g} : Área do grupo i_g
 i_g : Grupo de objetos
 i_o : Objeto
 K : Número de objetos no grupo
 S_{i_o} : Área do objeto i_o

A densidade global (GD) mede densidade de objetos não agrupados na tela através da relação:

$$GD = \frac{1}{A_n} \sum_{i_o=1}^{K_n} S_{i_o} \quad (26)$$

A_n : Área não agrupada
 i_o : Objeto
 K_n : Número de objetos não agrupados na tela
 S_{i_o} : Área do objeto i_o

Com LDi_g calculado para cada grupo e com a GD calculada, a complexidade de densidade (DC) é calculada através da relação:

$$DC = \frac{w_{ag}}{n_{tt}} \sum_{i_g=1}^{n_{tt}} LDi_g + w_{ang} \cdot GD \quad (27)$$

GD - Densidade de objetos não agrupados na tela

LDi_g - Densidade do grupo i_g

n_{tt} - Número de objetos na tela

w_{ag} - Razão entre a área total ocupada pelos grupos pela área total da tela

w_{an} - Razão entre a área total não agrupada pela área total da tela

4. TAMANHO

A métrica de tamanho contabiliza a diversidade de tamanhos para o mesmo tipo de objeto para calcular a complexidade de tamanho total SC . A complexidade de tamanho total SC é calculada através da relação:

$$SC = \sum_{x=1}^{\zeta} SC_x \cdot \psi_x \quad (28)$$

SC_x : Complexidade de tamanhos do tipo x

x : Tipo de objeto

ζ : Número total de tipos de objetos

ψ_x : Número de objetos do tipo x

A complexidade de tamanhos dos objetos do tipo x , SC_x , dada por:

$$SC_x = \frac{1}{\beta_x} \sum_{x=1}^{\beta_x} C_{tdx} \quad (29)$$

C_{tdx} : Número de tamanhos diferentes do objeto do tipo x

x : Tipo de objeto

β_x : Número de objetos do tipo x

5. AGRUPAMENTO

A métrica de agrupamento avalia os objetos não agrupados quanto a proporção e diversidades de tipos para calcular a complexidade de agrupamento (GT). A complexidade de agrupamento (GT) é calculada através da relação:

$$GT = \frac{\zeta}{M} w_{a,1} + w_{a,2} \quad (30)$$

M : Número total de objetos em todos os grupos

$w_{a,1}$: Razão do número de objetos total agrupados e o número total de objetos na tela
 $w_{a,2}$: Razão do número de objetos total não agrupados e o número total de objetos na tela
 ζ : Número total de tipos de objetos

6. COMPLEXIDADE DO *LAYOUT* (LC)

Com todas as cinco métricas calculadas, a complexidade do *layout* LC é calculada através da relação:

$$LC = 100\% \frac{0,84TAC + 0,76TBC + 0,8DC + 0,72SC + 0,88GT}{0,84 + 0,76 + 0,80 + 0,72 + 0,88} \quad (31)$$

DC : Complexidade de densidade
 GT : Complexidade de agrupamento
 TAC : Complexidade de alinhamento total
 TBC : Complexidade total de balanço
 SC : Complexidade de tamanho total

Do valor de LC , pode-se calcular a usabilidade do *layout* U_s pela relação:

$$U_s = 100\% - LC \quad (32)$$

LC : Complexidade de *layout*

ANEXO 2 – MODELO DE RAZÃO DOS CALORES ESPECÍFICOS

Nessa seção é apresentado o modelo de estimativa da razão dos calores específicos, utilizado na verificação da precisão do software na estimativa desse parâmetro. Esse modelo considera a fração de massa queima MFB , o fator de excesso de ar (λ) e a temperatura do gás (T) para estimar o valor da razão dos calores específicos (γ) através da relação (CEVIZ; KAYMAZ, 2005):

$$\gamma = MFB \cdot \gamma_b + (1 - MFB) \cdot \gamma_u \quad (33)$$

MFB : Fração de massa queimada

γ_b : Razão entre os calores específicos da massa queimada

γ_u : Razão entre os calores específicos da massa não queimada

As razões dos calores específicos da massa queimada e não queimada, γ_b e γ_u , respectivamente, são dados por:

$$\gamma_u = a_1 + a_2T + a_3T^2 + a_4T^3 + a_5T^4 + a_6T^5 + \frac{a_7}{\lambda} \quad (34)$$

$$\gamma_b = b_1 + b_2T + \frac{b_3}{\lambda} + b_4T^2 + \frac{b_5}{\lambda^2} + \frac{b_6T}{\lambda} + b_7T^3 + \frac{b_8}{\lambda^3} + \frac{b_9T}{\lambda^2} + \frac{b_{10}T^2}{\lambda} \quad (35)$$

T : Temperatura do gás

λ : Fator de excesso de ar

em que os respectivos coeficientes de calibração estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Coeficientes para função da razão dos calores específicos para misturas não queimadas e queimadas.

Coeficientes (γ_u)	Valores	Coeficientes (γ_b)	Valores
a_1	1,46202464	b_1	1,498119965
a_2	-0,000150666	b_2	-0,00011303
a_3	$-7,34852 \cdot 10^{-8}$	b_3	-0,26688898
a_4	$1,55726 \cdot 10^{-10}$	b_4	$4,03642 \cdot 10^{-8}$
a_5	$-7,6951 \cdot 10^{-14}$	b_5	0,273428364
a_6	$1,19535 \cdot 10^{-17}$	b_6	$5,7462 \cdot 10^{-5}$
a_7	-0,063115275	b_7	$-7,2026 \cdot 10^{-12}$
...	...	b_8	-0,08218813
...	...	b_9	$-1,3029 \cdot 10^{-5}$
...	...	b_{10}	$2,35732 \cdot 10^{-8}$

Esse modelo foi validado computacionalmente para valores de λ de 1 até 1,6.

ANEXO 3 – PROPRIEDADES DA GUI DO PAINEL DE CONTROLE

Nessa seção são apresentadas as informações da interface gráfica do usuário (GUI) do Painel de Controle. Essas informações foram utilizadas para estimativa da complexidade de *layout* utilizada na etapa de verificação do software, para avaliar se a GUI desenvolvida atende aos requisitos do software.

Tabela 5 - Propriedades gerais da GUI do Painel de Controle.

Propriedade	Valor
Número de Objetos	63
Número de Objetos Agrupados M	52
Razão de Objetos Agrupados $w_{a,1}$	0.825
Número de Widgets Não Agrupados	11
Razão de Widgets Não Agrupados $w_{a,2}$	0.175
Altura (px)	823.4
Comprimento (px)	1539.4
Centro de X, Xc (px)	769.7
Centro de Y, Yc (px)	411.7
Área (px ²)	1267542
Número de Grupos	6

Tabela 6 - Propriedades dos painéis/grupos de objetos.

Propriedade	1 CP	2 OP	3 OC	4 CoV's	5 OB	6 AGPV
X1	29,0	694,6	987,4	1283,4	1283,4	1437,0
X2	680,2	972,2	1268,2	1520,2	1520,2	1522,6
Y1	613,8	277,6	613,8	694,6	613,8	461,0
Y2	823,4	487,2	823,4	823,4	680,2	510,6
Número de Objetos	24	12	8	4	2	2
Comprimento (px)	651,2	277,6	280,8	236,8	236,8	85,6
Altura (px)	209,6	209,6	209,6	128,8	66,4	49,6
Área (px ²)	136492	58185	58856	30500	15724	4246
Nº de Tipos de Objetos	2	2	2	2	1	1
Razão de Tipos de Objetos	0,083	0,167	0,25	0,5	0,5	0,5

AGPV: Alternância do Gráfico PxV

CP: Combustion Parameters

OB: Operation Buttons

OC: Operation Conditions

OP: Operation Parameters

X1: Coordenada de X do ponto 1

X2: Coordenada de X do ponto 2

Y1: Coordenada de Y do ponto 1

Y2: Coordenada de Y do ponto 2

Quadro 22 - Propriedade dos objetos.

(continua)

Grupo	Identificação	Tipo de Objeto	X1 (px)	X2 (px)	Y1 (px)	Y2 (px)
1	pmax_txt	Rótulo	35,9	189,35	744,8	767,3
1	aipmax_txt	Rótulo	35,9	189,35	704,6	727,1
1	rmax_txt	Rótulo	35,9	189,35	664,4	686,9
1	ki_txt	Rótulo	35,9	189,35	624,2	646,7
1	pmax_inst	Caixa de Texto	197,5	262,8	740,3	772,45
1	aipmax_inst	Caixa de Texto	197,5	262,8	700,1	732,25
1	rmax_inst	Caixa de Texto	197,5	262,8	659,9	692,05
1	ki_inst	Caixa de Texto	197,5	262,8	619,7	651,85
1	pmax_avg	Caixa de Texto	279,1	344,4	740,3	772,45
1	aipmax_avg	Caixa de Texto	279,1	344,4	700,1	732,25
1	rmax_avg	Caixa de Texto	279,1	344,4	659,9	692,05
1	ki_avg	Caixa de Texto	279,1	344,4	619,7	651,85
1	ai10_txt	Rótulo	357,5	510,95	744,8	767,3
1	ai50_txt	Rótulo	357,5	510,95	704,6	727,1
1	ai90_txt	Rótulo	357,5	510,95	664,4	686,9
1	ai1090_txt	Rótulo	357,5	510,95	624,2	646,7
1	ai10_inst	Caixa de Texto	519,1	584,4	740,3	772,45
1	ai50_inst	Caixa de Texto	519,1	584,4	700,1	732,25
1	ai90_inst	Caixa de Texto	519,1	584,4	659,9	692,05
1	ai1090_inst	Caixa de Texto	519,1	584,4	619,7	651,85
1	ai10_avg	Caixa de Texto	600,7	666	740,3	772,45
1	ai50_avg	Caixa de Texto	600,7	666	700,1	732,25
1	ai90_avg	Caixa de Texto	600,7	666	659,9	692,05
1	ai1090_avg	Caixa de Texto	600,7	666	619,7	651,85
2	n_txt	Rótulo	701,5	808,95	408,6	431,1
2	pi_txt	Rótulo	701,5	808,95	368,4	390,9
2	lmep_txt	Rótulo	701,5	808,95	328,2	350,7
2	pmep_txt	Rótulo	701,5	808,95	288,0	310,5
2	n_inst	Caixa de Texto	815,8	881,1	404,1	436,25
2	pi_inst	Caixa de Texto	815,8	881,1	363,9	396,05
2	imep_inst	Caixa de Texto	815,8	881,1	323,7	355,85
2	pmep_inst	Caixa de Texto	815,8	881,1	283,5	315,65
2	n_avg	Caixa de Texto	895,5	960,8	404,1	436,25
2	pi_avg	Caixa de Texto	895,5	960,8	363,9	396,05
2	imep_avg	Caixa de Texto	895,5	960,8	323,7	355,85
2	pmep_avg	Caixa de Texto	895,5	960,8	283,5	315,65
3	sparktime_txt	Rótulo	994,3	1187	743,6	766,1
3	injtime_txt	Rótulo	994,3	1187	703,4	725,9
3	lnjduration_txt	Rótulo	994,3	1187	663,2	685,7
3	lambda_txt	Rótulo	994,3	1187	623,0	645,5
3	sparktime_set	Caixa de Texto	1192,9	1258,2	740,3	772,45
3	injtime_set	Caixa de Texto	1192,9	1258,2	700,1	732,25
3	lnjduration_set	Caixa de Texto	1192,9	1258,2	659,9	692,05
3	lambda_set	Caixa de Texto	1192,9	1258,2	619,7	651,85
4	covimep_txt	Rótulo	1290,3	1430,7	744,0	766,5
4	covpmax_txt	Rótulo	1290,3	1430,7	703,8	726,3
4	covimep_avg	Caixa de Texto	1428,7	1494	740,7	772,85
4	covpmax_avg	Caixa de Texto	1428,7	1494	700,5	732,65
5	iniciar_ba	Botão	1290,9	1396,7	621,3	654,7
5	salvar_b	Botão	1404,9	1510,7	621,3	654,7
6	log_rb	Botão Rádio	1445,2	1514	487,6	501,2
6	linear_rb	Botão Rádio	1445,2	1514	469,2	482,8
NA	ekey_txt	Rótulo	23,4	153	576,2	598,6

Quadro 22 - Propriedade dos objetos

(conclusão)

NA	ekey_tb	Caixa de Texto	23,4	340,2	549,8	572,2
NA	remarks_txt	Rótulo	446,6	576,2	576,2	598,6
NA	remarks_tb	Caixa de Texto	446,6	763,4	549,8	572,2
NA	terminal_txt	Rótulo	866,6	996,2	576,2	598,6
NA	terminal_tb	Caixa de Texto	866,6	1183,4	549,8	572,2
NA	ahrr_diagram	Eixos	62,6	524,4	305,58	511,38
NA	comb_diagram	Eixos	62,6	524,4	50,4	256,2
NA	pca_diagram	Eixos	609	1070,8	305,58	511,38
NA	KI_diagram	Eixos	609	1070,8	50,4	256,2
NA	pv_diagram	Eixos	1155,4	1524,8	50,392	511,39

NA: Não Agrupado

X1: Coordenada de X do ponto 1

X2: Coordenada de X do ponto 2

Y1: Coordenada de Y do ponto 1

Y2: Coordenada de Y do ponto 2