

Projeto conceitual de uma bancada de teste de motores a combustão interna

Iago Mateus Sá Aquino ^[1], Zorastro Torres Villar ^[2]

^[1] Universidade Federal Rural do Semiárido, Engenharia Mecânica; aluno; iago.aquino@alunos.ufersa.edu.br

^[2] Universidade Federal Rural do Semiárido, Engenharia Mecânica; zorastro@ufersa.edu.br

Data da defesa: 17/03/2025;

Resumo: Testar motores de combustão interna é fundamental para pesquisas e desenvolvimento de novas tecnologias voltadas a eficiência, redução de emissões e novos combustíveis. No entanto, o alto custo destes equipamentos especializados é fator limitante de sua aplicação em experimentos acadêmicos. Diante deste cenário, este trabalho desenvolveu um projeto conceitual de uma bancada dinamométrica de baixo custo, destinada a caracterização de motores de até 24hp. A bancada foi projetada para permitir a medição de potência e torque através de um dinamômetro hidráulico com curva característica conhecida, além do monitoramento dos parâmetros operacionais do motor. A metodologia incluiu a definição dos componentes essenciais, dimensionamento do sistema de aquisição de dados e cálculo da potência através da curva característica da bomba centrífuga aplicada. Como resultado, obteve-se um projeto funcional e viável para desenvolvimento e aplicação em pesquisas acadêmicas, contribuindo para o avanço da pesquisa na área de motores a combustão interna.

Palavras-chave: célula de testes, motores a combustão interna, dinamômetro hidráulico, teste de motores, teste de combustíveis

1. INTRODUÇÃO

Estima-se que 99,8% dos meios de transporte do mundo, são movidos por motores a combustão (MCI) e o setor de transportes é responsável por 24% das emissões diretas de CO₂ [1]. No Brasil, que figura entre os 10 maiores mercados automotivos do mundo, o percentual é 13% do total de emissões, sendo 91% deste valor relacionado somente ao transporte rodoviário, que de maneira predominante são utilizados MCI [2]. Enquanto a demanda Global de combustíveis para veículos com motores de combustão interna de ciclo Otto, só aumenta de modo que nos próximos 15 anos os veículos equipados com MCI devem permanecer compondo a maior parcela do mercado [3].

A conjuntura atual aponta para a seguinte situação: há cada vez mais veículos com motores a combustão interna, há cada vez mais demanda e os controles de emissões e redução de danos ambientais cada vez mais rigorosos, logo há uma convergência que indica a necessidade de definição de rotas tecnológicas a serem seguidas, uma das proeminentes rotas que devem ser priorizadas no Brasil trata de: combustíveis alternativos e motores mais eficientes, não uma ou outra medida, mas as duas em paralelo [4].

Há uma demanda de motores mais eficientes e combustíveis mais ecológicos, que emitam menos gases de efeito estufa (GEE), de maneira que estudos sobre motores e combustíveis tem algumas necessidades em comum, como uma bancada dinamométrica capaz de permitir avaliação dos parâmetros dos motores e realizar pesquisas de desenvolvimento de combustíveis verde e motores mais eficientes. Já que as regulamentações mundiais muitas vezes estão no limiar do que é tecnicamente possível de ser feito, então há a necessidade de novas tecnologias e novos combustíveis.

“Deve-se ser ousado nas metas, mas manter em mente o princípio do que é tecnicamente possível” Andreas Scheuer – Ministro dos Transportes Alemão.

Uma das abordagens mais sólidas para determinar o que é tecnicamente viável reside na realização de testes, simulações e na imposição de condições de validação rigorosas. É nesse princípio que se fundamenta o presente trabalho: o desenvolvimento de uma bancada de testes para a caracterização de motores a combustão interna (MCI). Para tal, são necessários equipamentos capazes de mensurar parâmetros críticos como torque, potência, eficiência e suas curvas características. Embora bancadas dinamométricas comerciais atendam a essa demanda, seu elevado custo limita o acesso de instituições e projetos de pesquisa, especialmente para motores de pequeno porte. Diante desse cenário, propõe-se o desenvolvimento conceitual de uma bancada dinamométrica de baixo custo, projetada para suprir necessidades técnicas de pesquisa e ensino. Os objetivos incluem: (i) análise mercadológica comparativa para definir especificações técnicas e custos de referência; (ii) elaboração de projeto conceitual detalhado, integrando memorial descritivo e estimativa orçamentária; e (iii) viabilização de aplicações práticas em estudos de eficiência volumétrica, testes com novos combustíveis e atividades didáticas. A bancada proposta visa democratizar o acesso a tecnologias de diagnóstico motor, oferecendo uma alternativa economicamente viável e capaz de se replicada em laboratórios de baixa complexidade.

2. Referencial Teórico

2.1. Tipos de Motores de combustão interna

São considerados como máquinas térmicas nas quais para o processo de combustão o fluido de trabalho é convertido em energia mecânica. Os produtos resultantes da combustão, inseridos na mistura de ar/combustível, são confinados internamente em uma câmara de combustão. [5]

Este trabalho irá tratar somente dos motores de combustão interna, aqueles que a transformação do AR/Combustível por meio da combustão, ocorre em uma câmara interna da máquina, ou seja, o fluido motor participa da combustão. Podendo ser de alguns ciclos conhecidos, mas neste caso tratando mais especificamente daqueles que são comandados por ignição (Ciclo Otto), motores onde a mistura combustível-ar é admitida, previamente dosada ou formada no interior dos cilindros, e inflamada por uma faísca que ocorre entre os eletrodos de uma vela. [6] e dos motores que a ignição do combustível é realizada por compressão (Ciclo Diesel), ou motor de ignição por compressão, que não tem sistema de preparação da mistura exterior nem sistema de ignição. Aspira ar puro que, submetido à elevada pressão atingida no final da compressão, atinge uma temperatura suficiente para garantir a inflamação do combustível, diesel, à medida que é injetado no seio do ar. [7]

2.2. Rendimento/Eficiência.

O rendimento de um MCI, é a relação entre a potência mecânica desenvolvida na saída do virabrequim e a energia que lhe é fornecida no combustível em forma de calor, através da combustão [5]. O rendimento de um MCI, está diretamente ligado as questões relacionadas a emissões e novos combustíveis, tendo em vista que quanto maior o rendimento de um determinador motor, menor a quantidade de combustível necessária para gerar mesma potência, e consequentemente menor a quantidade de emissões.

2.3. Potência e Torque.

A forma mais direta de compreender potência e torque é considerar o torque como o produto do trabalho realizado pelo motor, enquanto a potência representa a taxa de produção desse trabalho [7]. Esses conceitos elucidam a eficiência na conversão da energia química do combustível em energia mecânica, evidenciada pelas curvas características dos motores. Nelas, observa-se que o torque é proporcional à massa de ar aspirada, e a potência resulta da relação entre o torque e a rotação. Em baixas rotações, as perdas de carga do fluido são elevadas, comprometendo a eficiência; conforme a rotação aumenta, o fluido se acelera, diminuindo essas perdas e permitindo uma maior admissão de ar, até que se alcance o ponto máximo de torque. A partir desse ponto, a rotação continua a aumentar a potência, mas as perdas por atrito acabam superando os ganhos obtidos com a redução das perdas de carga e o aumento da eficiência volumétrica.

3. Metodologia

3.1. Descrição do Projeto – Identificação da necessidade

Foi feito um levantamento mercadológico das opções disponíveis de motores existentes no mercado, para estabelecer uma faixa de torque e potência de interesse para o laboratório e as dimensões desses motores que influenciem no projeto da bancada, como a fixação do motor, espaço disponível para intervenções de todos os

tipos, desde manutenção até adaptação de sensores. Os dados serão catalogados com o objetivo de que a bancada atenda o maior número possível de motores, com auxílio do Excel para registo e do Power bi para segmentar as informações.

Sendo um projeto conceitual, a bancada será dimensionada para acomodar periféricos sem incompatibilidades, considerando esforços estruturais baixos, mesmo com perfis metálicos menos robustos. O projeto mecânico seguirá a metodologia de Norton [8], inicialmente em forma esquemática e, posteriormente, detalhado em software CAD.

Com auxílio do Matlab são interpolados valores das curvas características das bombas envolvidas e plotados gráficos relevantes para análise e desenvolvimento do dinamômetro hidráulico, baseados nos princípios físicos adotados no projeto.

O projeto culminou com o memorial descritivo e o detalhamento de todos os componentes da bancada e a fundamentação da escolha destes através da aplicação do método da matriz morfológica e adequações seguindo as orientações do Brunetti [7], para uma sala de testes de motores: nível de ruído controlado, integral visualização do motor e periféricos, fácil acesso ao motor em testes, ampla ventilação do motor e gases do escapamento.

3.2. Identificação da necessidade

Apesar da grande quantidade de bancadas didáticas para motores elétricos, para motores a combustão até o momento da realização deste trabalho, só havia duas empresas que comercializam bancadas didáticas no Brasil: Intechno e Widetech, com valores superiores a R\$170.000,00. Surgindo a necessidade de buscar desenvolver uma bancada semelhante, com custo reduzido e de simplificada fabricação.

3.3. Pesquisa de suporte, levantamento dos motores disponíveis e elaboração de tabela com suas características e dimensões

Para as dimensões, o motor é considerado como um bloco retangular, de maneira que o projeto possa contar com uma boa aplicabilidade para diferentes tipos de motores e espaço amplo para intervenções.

Segue em anexo a Tabela 1, em sua forma compacta, para os motores de Ciclo Otto, com 25 modelos de motores diferentes, com potência de 5,5hp a 20hp e torque de 10,8 a 31N.m, de 13 fabricantes diferentes, contemplando boa parte dos motores estacionários de ciclo otto disponíveis no mercado, a planilha completa consta nos anexos.

Tabela 1: Tabela de motores de ciclo otto

Tabela de Motores - Ciclo Otto										
Item	Fabricante	Modelo	Potência (HP)	Torque (Nm)	Rotação (RPM)	Peso (Kg)	Combustível	Consumo (L/h)	Rc	Preço Médio
1	Zmax	ZM55G4T	5,5	10,8	2500-3600	15	Gasolina	1,80	8,5:1	R\$ 637,45
2	Honda	GX160	5,5	10,8	2500-3600	15	Gasolina	1,40	8,5:1	R\$ 2.088,99
3	Toyama	TE65X	6,5		3600	14,7	Gasolina	1,20	8,5:1	R\$ 569,14
4	Carbo Fak	FAK212ME	7,0	14	4000	13	Gasolina	1,60	8,5:1	R\$ 637,69
5	Kawashima	GE700b	7,0	14	2500- 3600	16	Gasolina	1,50	8,5:1	R\$ 549,09
6	Tssaper	TSMGE7	7,0	12	3600	17	Gasolina	1,20	8,0:1	R\$ 686,22
7	Toyama	TF70XP	7,0		3600	16	Gasolina	2,30	8,5:1	R\$ 740,49
8	Nagano	NGM70	7,0	12	3000-3600	17	Gasolina	1,20	8,5:1	R\$ 733,36
9	Buffalo	7,0	7,0	13,72	2500-3600	17	Gasolina	1,50	8,5:1	R\$ 826,93
10	Branco	B4T-8,5	8,5	19	2500-3600	26,9	Gasolina	2,40	8,5:1	R\$ 2.260,94
11	Kawashima	GE900-E	9,0	17	2500-3600	29	Gasolina	2,00	8,1:1	R\$ 1.869,13
12	Toyama	TE100XP	10,0		3600	30	Gasolina	2,00	8,5:1	R\$ 2.144,77
13	Honda	GX390	13,0	26,5	3600	31,5	Gasolina	3,70	8,0:1	R\$ 4.240,07
14	Kawashima	GE1300B	13,0	26,5	2500-3600	31	Gasolina	3,70	8,5:1	R\$ 1.710,59
15	Anmax	AN390	13,0	24	3600	31	Gasolina	3,70	8,0:1	R\$ 1.637,90
16	Branco	B4T-13,0	13,0	26,5	2500-3600	31	Gasolina	3,60	8,0:1	R\$ 2.376,37
17	Vulcan	VM390	13,0	27	2500-4000	32,7	Gasolina	3,10	8,5:1	R\$ 1.903,97
18	Tssaper	TSMGE15	15,0	24	2500-3600	32	Gasolina	3,70	8,0:1	R\$ 1.543,24
19	Evald	EVS420F	15,0		3600	29,5	Gasolina	3,70	8,0:1	R\$ 1.567,13
20	ZMAX	ZM150G4T	15,0	28	2880-3600	58	Gasolina	4,00	8,0:1	R\$ 1.714,51
21	Buffalo	BFG16	16,0	31,38	2500-3600	32	Gasolina	4,20	9,0:1	R\$ 2.596,12
22	Kawashima	GE1800-E	18,0	31	2500-3600	40	Gasolina	3,60	9,0:1	R\$ 3.710,91
23	Matsuyama	19HP-NG	19,0		3600	33	Gasolina	0,49	9,0:1	R\$ 2.791,36
24	Toyama	TE200XP	20,0		3600	46	Gasolina	-	-	R\$ 7.066,30
25	Toyama	TDE200VE-XP	20,0		3600	38	Gasolina	-	-	R\$ 4.703,00

Fonte: Autoria própria

A Tabela 2, é produzida com as mesmas estratégias e objetivos, com 25 modelos listados de 6 fabricantes diferentes, no entanto relaciona somente os motores de Ciclo Diesel, de 5 a 24hp, com torque de 8,3 a 65,6N.m, a versão completa também consta em anexo.:

Tabela 2: Tabela de motores de ciclo diesel

Tabela de Motores - Ciclo Diesel										
Item	Fabricante	Modelo	Potência (HP)	Torque (Nm)	Rotação (RPM)	Peso (Kg)	Combustível	Consumo (L/h)	RC.	Preço Médio
1	Branco	BD5.0	5,0	8,3	2800-3600	26	Diesel	1,00	20,0:1	R\$ 2.961,47
2	Toyama	TDE50XP	5,0		3600	25	Diesel	1,00	20,0:1	R\$ 2.118,45
3	Zmaxx	ZM50D	5,0	10	2880-3600	24,2	Diesel	1,20	20,0:1	R\$ 2.324,68
4	Branco	BD7.0	7,0	14,7	2000-3600	33	Diesel	1,41	20,0:1	R\$ 2.977,83
5	Buffalo	BFDE7.0	7,0	15	2500-3600	34	Diesel	1,80	20,0:1	R\$ 3.915,43
6	Zmaxx	ZM70DE	7,0	13,6	2880-3600	35	Diesel	1,50	20,0:1	R\$ 3.916,82
7	Toyama	TDE70XP	7,0		3600	33	Diesel	1,50	20,0:1	R\$ 3.156,73
8	Vonder	68.94.007.000	7,0	10,6	3600	36	Diesel	2,10	19,0:1	R\$ 3.641,74
9	Toyama	TDW8D	7,7		2400	90	Diesel	2,30	20,0:1	R\$ 3.586,99
10	Buffalo	BFD 10.0	10,0	27,5	2000-3600	45,8	Diesel	2,10	20,0:1	R\$ 2.975,88
11	Branco	BD10.0	10,0	26,5	2000-3600	46	Diesel	2,15	19,0:1	R\$ 3.547,95
12	Vonder	68.94.010.000	10,0	16,7	3600	50	Diesel	2,10	20,0:1	R\$ 3.502,27
13	Toyama	TDE110TBE-XP	11,0		3600	57	Diesel	2,10	20,0:1	R\$ 3.819,46
14	Toyama	TDE130XP	12,5		3600	51	Diesel	2,40	20,0:1	R\$ 4.209,19
15	Zmaxx	ZM130DE	13,0	23,5	3600	48	Diesel	2,40	20,0:1	R\$ 3.877,95
16	Kawashima	DE-1300B	13,0	21,9	3600	50	Diesel	2,70	19,0:1	R\$ 4.529,92
17	Buffalo	BFDE13.0	13,0	29,42	2000-3600	54,8	Diesel	2,60	20,0:1	R\$ 4.126,43
18	Branco	BD 13.0	13,0	34,4	2000-3600	48	Diesel	2,70	20,0:1	R\$ 4.746,67
19	Toyama	TDE140XP	13,5		3600	47	Diesel	-	20,0:1	R\$ 3.756,97
20	Zmaxx	ZM150DE	15,0	25,5	2880-3600	58	Diesel	-	20,0:1	R\$ 3.942,75
21	Kawashima	DE-1500BE	15,0	23,3	3600	51	Diesel	2,70	19,0:1	R\$ 4.657,01
22	Toyama	TDE160-EXP	16,0		3600	65	Diesel	-	19,0:1	R\$ 5.575,44
23	Toyama	TDWE18-XP	16,5		2200	190	Diesel	5,69	17,0:1	R\$ 6.797,66
24	Buffalo	BFDE18.0	17,4	65,6	1800-2220	180	Diesel	3,50	17,0:1	R\$ 7.210,65
25	Toyama	TDWE22RE	24		2200	210	Diesel	4,75	17,0:1	R\$ 8.783,33

Fonte: Autoria própria.

3.4. Definição dos Objetivos:

A pesquisa de suporte busca gerar um espaço amostral estratégico, com boa variação nas características dos motores disponíveis no mercado (dimensões, peso, potência, torque, preço e consumo). O objetivo é projetar uma bancada capaz de atender diferentes motorizações.

A estrutura da bancada, sua fabricação e instrumentação deve utilizar recursos que facilitem a sua construção por equipes e laboratórios de baixa complexidade, no que tange a aspectos físicos como uso e aplicação de ferramentas e procedimentos simples. Nos aspectos eletrônicos: softwares e hardwares com plataformas de código aberto e aplicação básica de eletrônica e prototipagem. Com a finalidade de que o projeto desenvolvido seja de fato de baixo custo frente aos seus pares e que realmente possa ser não somente projetado como executado futuramente.

Que seja possível aferir informações necessárias para caracterização de motores e desenvolvimento de pesquisas e atividades didáticas com motores de combustão interna, especialmente sobre eficiência e parâmetros fundamentais de funcionamento e emissão.

3.5. Especificações de tarefas, critérios na seleção dos motores

Critérios para seleção dos motores: peso que possibilite a movimentação e montagem da bancada sem auxílio de ferramentas de transporte, em alinhamento com a NR17 e a legislação vigente (CLT). As dimensões do motor são projetadas para atender 95% dos modelos segundo a análise estatística, que resulta nas seguintes dimensões aproximadamente: 850x550x750, conforme Tabela 3.

Tabela 3: Análise estatística

Análise estatística (95%)					
Média A (μ)	543,2	Desvio Padrão A (σ)	144,2567156	Sugestão L ($\mu+2\sigma$)	831,7134
Média L (μ)	454,76	Desvio Padrão L (σ)	39,36292672	Sugestão A ($\mu+2\sigma$)	533,4859
Média P (μ)	555,72	Desvio Padrão P (σ)	92,45427699	Sugestão P ($\mu+2\sigma$)	740,6286

Fonte: autoria própria

Preço, como a referência de custo da bancada são outras bancadas disponíveis no mercado, superior a R\$150.000, levando em consideração um teto de 50% do valor de mercado, para que a bancada seja considerada

de baixo custo, será adotado o critério do motor custar no máximo 10% do orçamento total, neste caso: R\$7500,00, considerando o preço médio das 3 cotações obtidas.

Potência, são selecionados motores com no mínimo 10 hp e no máximo 24hp, a fim de otimizar os testes e caracterização que podem ser realizadas sem interrupção total do funcionamento e sem a necessidade de um freio dinamométrico muito oneroso.

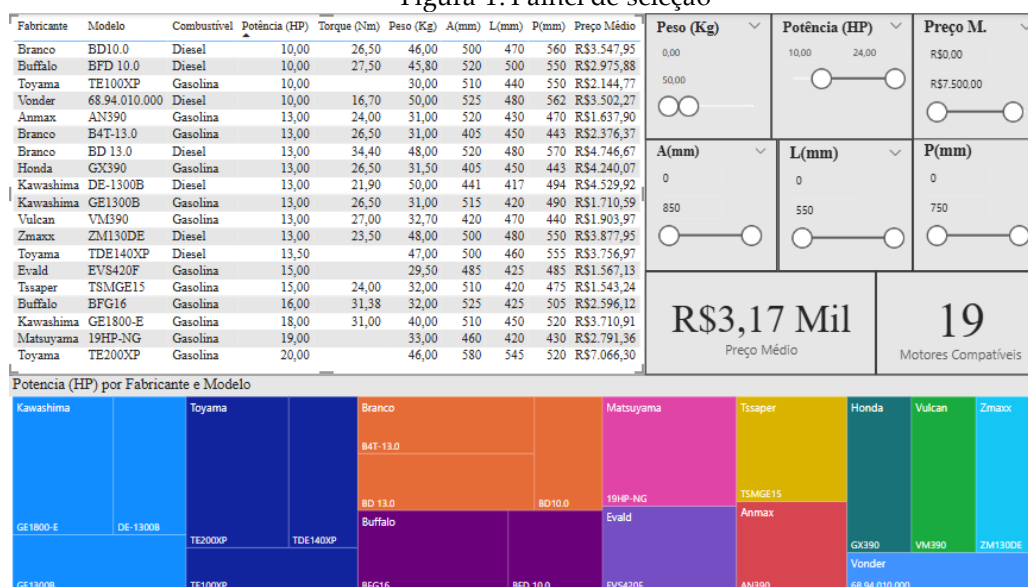
Dois fatores serão critérios de decisão entre as opções ao final da triagem: o motor com maior torque disponível a mais baixa rotação e a disponibilidade de informações técnicas do motor através do fabricante, como gráficos de rendimento e informações específicas, pois estes devem ser parâmetros de referência para caracterização.

3.6. Síntese

3.6.1. Pesquisa de mercado e motores compatíveis

Os critérios adotados com auxílio de um painel de segmentação no Power BI, apontam para 19 opções de modelos de motores compatíveis, com preço médio de R\$3170,00 aproximadamente, com características conforme anexo na Figura 4, com os modelos selecionados pelos critérios estabelecidos.

Figura 1: Painel de seleção

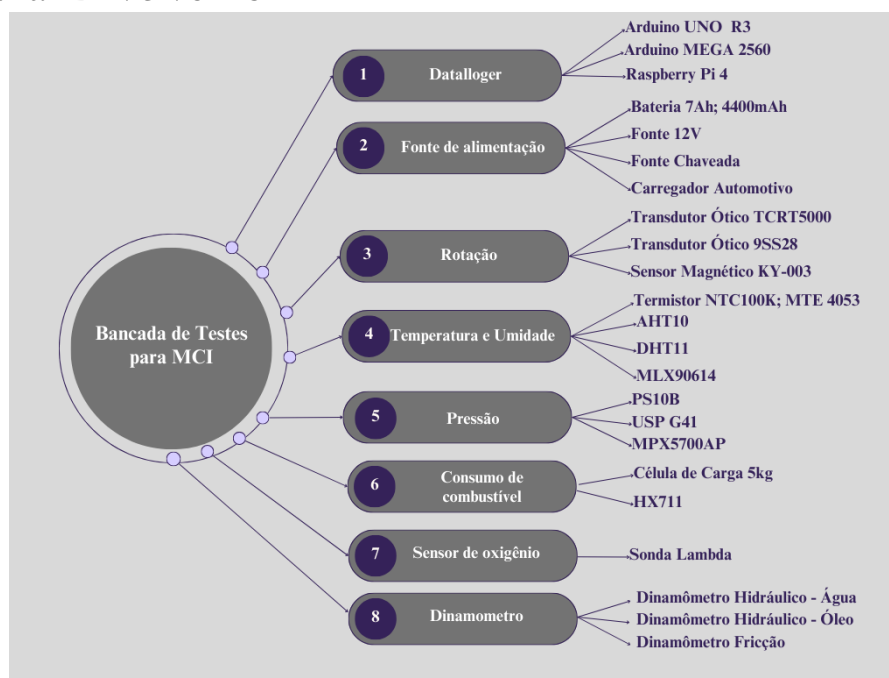


Fonte: autoria própria.

3.6.2. Concepção de projeto e parâmetros a serem lidos

Para garantir a caracterização completa do motor, o datalogger da bancada foi projetado para medir e registrar nove parâmetros críticos: (i) rotação do motor, (ii) temperatura do motor e ambiente, (iii) umidade ambiente, (iv) pressão de óleo, (v) consumo de combustível, (vi) relação ar-combustível (A/C), e (vii) torque e potência via dispositivo dinamométrico. A seleção dessas variáveis baseou-se em uma matriz morfológica conforme Figura 2, que cruzou soluções técnicas viáveis com requisitos de custo, precisão e compatibilidade. Para otimizar a decisão, as opções de componentes foram catalogadas na forma de listagem de atributos em planilhas no Excel e analisadas no Power BI, permitindo a segmentação por critérios como faixa de medição, interface de comunicação e custo unitário. Essa abordagem sistemática, aliada ao fluxograma de aquisição de dados assegurou que a bancada atendesse a robustez necessária ao dispositivo mantendo a economia de recursos.

Figura 2: Matriz Morfológica



Fonte: Autoria Própria

3.6.3. Concepção do freio dinamométrico

A princípio são geradas 3 concepções de dinamômetro com princípios diferentes:

- Hidráulico-óleo: Bomba de engrenagem Vista 2APF08L93P183SS ou 2APF16L93P183SS, radiador de óleo com eletro ventilador Folego Turbo, sensor de fluxo e válvulas de restrição.
- Hidráulico-água: Bomba Centrífuga e válvula globo, sensor de fluxo de água, YF-B7 ou YF-S201, radiador com eletro ventilador.
- Dinamômetro de fricção: discos de freio HF87A, pinça de freio VW-509, cilindro mestre C2173, célula de carga 50Kg e hx711.

4. Resultados

4.1.1. Análise quanto ao motor

Há 19 modelos de motores compatíveis, no entanto se destaca o fabricante Branco, a disponibilidade e acesso a informações técnicas de relevante importância para qualquer pesquisa com motores a combustão interna, como curvas de torque, potência e consumo específico. Outro critério de escolha do modelo BD13.0 é o seu proeminente torque frente aos seus pares, sendo inclusive superior a motores de maior deslocamento, com pico em rotação compatível com a maior parte das bombas centrífugas do mercado, conforme podemos observar na Figura 7, garantindo uma maior resistência a interrupções durante os testes e experimentos, principalmente no uso do dinamômetro.

4.1.2. Análise quanto ao dinamômetro

A seleção do dinamômetro adequado é fundamentada nas disposições técnicas do [6] e [7] conforme Tabela 4.

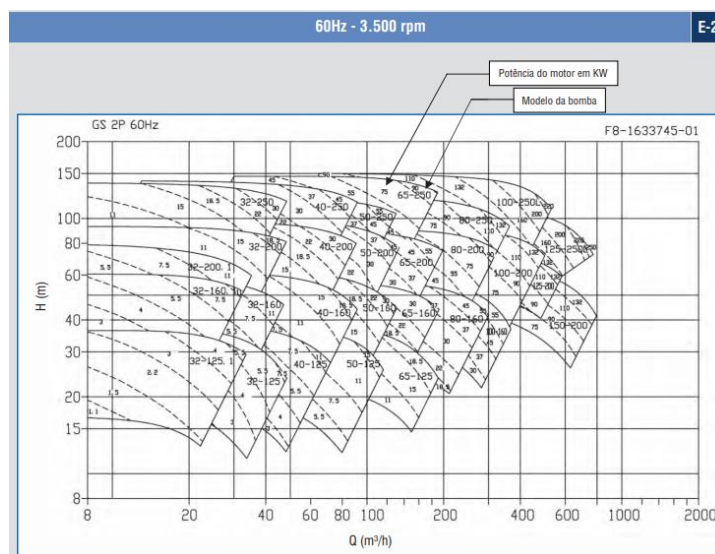
Tabela 4: Características dinamômetro

Tipo	Vantagens	Desvantagens
Inercial	Barato, obtenção rápida das curvas de binário e potência e não necessita de arrefecimento	Só serve para medição das curvas de torque e potência
Hidráulico - Froude	Obsoleto, robusto, tolerante a sobrecargas	Resposta lenta, controle deficiente de carga
Hidráulico - Enchimento Variável	Rápida resposta, robusto, tolerante a sobrecargas, possível automação do controle	Problemas de cavitação e corrosão
Hidráulico - Disco	Indicado para velocidades elevadas	Mau funcionamento em baixas velocidades
Corrente contínua	Rápida resposta, fácil controle eletrônico, serve como motor, não necessita arrefecimento necessita de arrefecimento	Caro, inércia elevada
Corrente alternada	Mesmas que anterior e baixa inércia	Caro
Correntes de Foucault	robusto, rápida resposta, fácil controle eletrônico, baixa inércia	Sensível a má refrigeração e a sobrecargas, não funciona como motor
Fricção	Barato, fornecem o torque máximo deste parado	Elevado desgaste, só aplicado a baixas velocidades

Fonte: Jorge Martins

No primeiro momento é descartado o dinamômetro por fricção, dada a dificuldade de dissipação por calor e limitação a potências pequenas, restringindo a escolha aos dinamômetros hidráulicos, pela sua precisão, boa capacidade de uso em diferentes faixas de rotação e potência. Se destaca o uso do dinamômetro hidráulico com água como fluido de trabalho devido a ampla disponibilidade de curvas características das bombas centrífugas, conforme registros da FL Bombas, Schneider e Ebara, que permite a iteração com dados reais no processo de seleção da bomba para o motor definido, usando informações de potência, altura manométrica e vazão, conforme Figura 3.

Figura 3: Curvas bombas Ebara



Fonte: Ebara

Para bombas de engrenagens disponíveis, é possível que o atrito cisalhante do fluido, óleo, seja capaz de interromper o funcionamento dos motores da faixa de potência determinada. Para finalizar de maneira definitiva a escolha por utilizar água, o custo e compatibilidade dos medidores de fluxo com os demais componentes do projeto também é discrepante.

4.1.3. Análise quanto a bomba centrífuga

Esta análise foi desenvolvida com auxílio do Matlab e as curvas características das bombas dos 3 fabricantes citados, com objetivo de que seja desenvolvido um banco de dados com as características das bombas e avaliado a compatibilidade para aplicação do dinamômetro hidráulico para potência do motor escolhido, as informações de vazão, pressão e temperatura devem nortear a escolha dos sensores.

O princípio fundamental do dinamômetro hidráulico se baseia na 1ª lei da termodinâmica, onde a potência gerada por um motor (P_m) acoplado diretamente a uma bomba centrífuga se transforma basicamente em calor e potência hidráulica (P_h). Sabendo como a bomba transforma essa potência do motor em potência hidráulica de acordo com as curvas características e as medições de vazão, pressão de sucção, pressão de recalque, temperatura e informações do fluido de trabalho, é possível calcular a potência gerada pelo motor.

O cálculo da potência gerada pelo motor, parte do cálculo da altura manométrica total (H), da Equação 1:

$$H = \frac{P_{recalque} - P_{sucção}}{\rho * g} + percas \quad (1)$$

A princípio não é estabelecido o uso de um trocador de calor, a fim de que se evite o máximo possível as percas de carga que impactam no cálculo da potência, essa consideração deve ser confrontada com o valor de calor mensurado posteriormente.

Os primeiros dados obtidos pela célula de teste no cálculo da potência hidráulica são as pressões de sucção, recalque e a vazão volumétrica, para cálculo da altura manométrica total (H) e cálculo da potência hidráulica (Ph), na Equação 2:

$$Ph = \rho * g * Q * H \quad (2)$$

O acoplamento direto do eixo do motor ao eixo da bomba, considerando a eficiência do conjunto, obtida através da análise das curvas características, conforme Equação 3:

$$P_{motor} = \frac{Ph}{\eta} \quad (3)$$

Para avaliar a quantidade de calor gerada, foi considerado um reservatório de 100L de água, ou 99,7kg de massa, considerando o rendimento hidráulico que deve ser extraído da curva característica para encontrar o percentual da potência hidráulica que é transformado em calor, na Equação 4:

$$100 * \left(1 - \left(\frac{1}{\eta}\right)\right) = \text{potência dissipada em calor} \quad (4)$$

Considerando um rendimento hidráulico de 0.8, cerca de 25% da potência é transformada em calor. para operação do dinamômetro, como a potência hidráulica é calculada em watts, o cálculo do calor gerado em 1 hora (3600s) de operação é obtido na Equação 5 e a variação de temperatura na Equação 6:

$$Q = (0,25 * Ph) * t \quad (5)$$

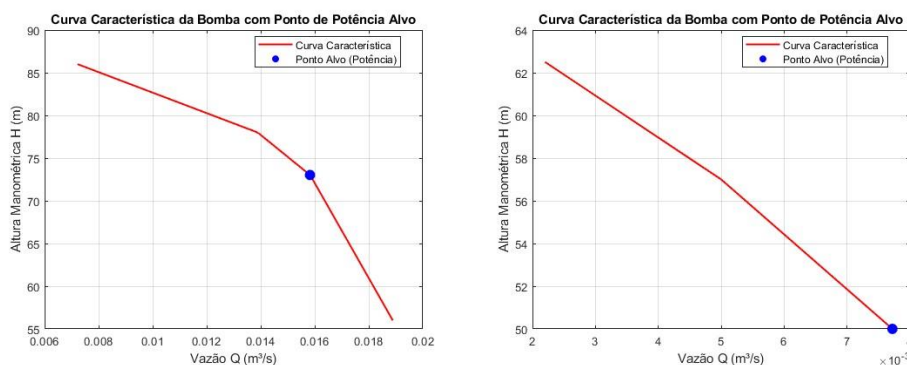
$$\Delta T = \frac{Q}{m * c} \quad (6)$$

Fazendo uma consideração de temperatura máxima de 100°C, $\Delta t=75$, a potência máxima do motor a ser testado seria limitada em 80,2Hp.

Para variar a carga hidráulica da bomba, é utilizado uma válvula de restrição após a bomba, aumentando a resistência imposta ao motor testado, alterando a maneira como a potência mecânica se transforma em hidráulica e calor.

Para avaliar a capacidade operacional para medição da potência do motor, é utilizado o Matlab para interpolar os valores das curvas características, e aplicar os princípios anteriores para que seja feita uma estimativa de qual valor de altura monométrica total (H), fluxo (Q) e calor (W) será a medição de potência máxima, gerando um gráfico que permite avaliar a capacidade operacional da bomba para o dinamômetro, conforme é possível ver na Figura 4.

Figura 4: Análise da bomba no matlab



Fonte: autoria própria

É possível verificar que na imagem da direita, a medição da potência máxima do motor está no limite da capacidade operacional da bomba, o que traz graves problemas de cavitação e sobrecarga do equipamento,

enquanto a imagem da direita está adequada a capacidade da bomba, é possível observar na Figura 9, a quantidade de potência dissipada na forma de calor e a eficiência do conjunto:

Tabela 5: Resultados matlab

Resultados - Matlab		
Potência Mecânica do Motor (W)	9694.1	
Modelo da Bomba	Bomba FL-40 - 3500rpm	Bomba FLE-100 - 3500rpm
Vazão no Ponto da Potência Alvo	0.0077 m³/s (27.80 m³/h)	0.0158 m³/s (56.97 m³/h)
Altura Manométrica no Ponto da Potência Alvo	50.00 m	73.02 m
Eficiência no Ponto Alvo	47.00%	54.49%
Potência Dissipada por Calor no Ponto Alvo	7919.25 W (81.69% da Pm)	3535.58 W (36.47% da Pm)

Fonte: autoria própria

4.1.4. Análise quanto aos periféricos

A análise de cada componente sugerido na concepção de projeto, será desenvolvido com auxílio do Excel, filtrando cada componente e criando tabela com subtotal, analisando suas características operacionais e as premissas de projeto, conforme Figura 10 abaixo, com todos os componentes.

Tabela 6: Seleção de componentes

Seleção de Componentes								
Função	Descrição	Fabricante	Modelo	Tipo	Faixa de Operação	Precisão	Valor	
Datalogger	Arduino		UNO R3		14 Pinos Digitais		R\$ 51,75	
Datalogger	Arduino		MEGA 2560		54 Pinos Digitais		R\$ 149,96	
Datalogger	Raspberry Pi		4B 4Gb Ram		40 Pinos Digitais		R\$ 711,55	
Bateria	Bateria C/ Carregador	JCV	18650	LI-on	4400Mah		R\$ 118,65	
Bateria	Bateria Gel	Moura	12 MVA-12	Estacionária	12,7 - 14,8v		R\$ 266,30	
Bateria	Bateria Gel	Moura	12 MVA-7	Estacionária	12,7 - 14,8v		R\$ 169,00	
Fonte	Fonte C/Jacaré	Starpower	SF 12V		12v 1,2ah - 10W		R\$ 120,90	
Fonte	Fonte Chaveada	Embralumi		Colmeia	12v 5ah - 60W		R\$ 30,31	
Fonte	Carregador Automotivo	Trafotron	Cva2ah	Automático	12v 2ah - 24W		R\$ 109,90	
Regulador de tensão	LM2596 C/Display		LM2596	Step-Down	1,5 a 30V		R\$ 24,99	
Registro de dados	HW-125		HW125	Micro Sd	3,3 A 5V		R\$ 9,90	
Registro do tempo	RTC-DS3231		DS3231		3,3 A 5V		R\$ 11,99	
Leitura de rotação	TCRT5000		TCRT5000	Infravermelho	3,3 A 5V / 0 a 50 °C		R\$ 6,99	
Leitura de rotação	9S528		9S528	Infravermelho	3,3 A 5V / 0 a 70 °C		R\$ 7,40	
Leitura de rotação	KY-003		KY-003	Magnético	4,5 a 24v / -40 a 125°C		R\$ 6,90	
Temperatura Motor	Termistor NTC 100K com Cabo		NTC 100K	Termistor	-40 a 200°C		R\$ 7,90	
Temperatura Motor	MTE 4053	MTE	4053	Termistor			R\$ 49,50	
Temperatura Ambiente	DHT11		DHT11		20% a 90% / 0°C a 50°C	+5%/-2°C	R\$ 8,90	
Temperatura Ambiente	IR-MLX90614		MLX90614	Infravermelho	-40 a 125°C	+0,5°C	R\$ 92,90	
Temperatura Ambiente	AHT10		AHT10		0 a 100%/-40 a 85°C	+2%/-0,3°C	R\$ 13,98	
Leitura de pressão	PS10B	Fultech	PS10	Transdutor	0 a 10bar - 0 a 125°C	+0,5%	R\$ 646,80	
Leitura de pressão	USP-G41			Transdutor	0 a 12bar / -20 a 105°C	+1,5%	R\$ 163,44	
Leitura de pressão	MPX5700AP				0,15 a 7bar / -40 a 125°C	+2,5%	R\$ 334,56	
Leitura de Consumo	Célula de carga 5kg + HX711			Ponte Wheatsone	-20 a 60°C	+0,03%	R\$ 35,45	
Amplificador de Sinal	Módulo HX711		HX711	Amplificador			R\$ 8,67	
Leitor oxigênio	Sonda Lambda	Bosch	258986602				R\$ 272,00	
Dinamometro	Bomba de Engrenagens	Vista	2APF08L93P183SS	Óleo	8cm³/rev		R\$ 719,00	
Dinamometro	Bomba de Engrenagens	Vista	2APF16L93P183SS	Óleo	16cm³/ver		R\$ 459,00	
Dinamometro	Radiador de Óleo c/eletoventilador	Folego Turbo		Óleo	380ml		R\$ 1.079,90	
Dinamometro	Medidor de fluxo	Simokit	SMEAP	Óleo	1 a 30L/min / 1 a 80°C	0,50%	R\$ 389,00	
Dinamometro	Válvula Globo	Hambor	PP	Óleo	-20°C a 210°C		R\$ 59,00	
Dinamometro	Bomba Centrífuga	Branco	B-715 M	Água			R\$ 1.369,90	
Dinamometro	Bomba Centrífuga	Schneider	BC92	Água	Até 70°C		R\$ 1.390,00	
Dinamometro	Bomba Centrífuga	Thebe	Tha-16	Água	Até 140°C		R\$ 1.535,60	
Dinamometro	Bomba Centrífuga	Ferreira Lopes	Fle 50	Água			R\$ 1.833,50	
Dinamometro	Válvula Globo	Hambor	PP	Água	-20°C a 210°C		R\$ 59,00	
Dinamometro	Medidor de fluxo		YF-B7	Água	1 a 25L/min / Até 120°C e 17,5Bar		R\$ 103,03	
Dinamometro	Medidor de fluxo		YF-S201	Água	1 a 30L/min / Até 80°C e 17,5Bar		R\$ 43,65	
Dinamometro	Radiador - XT660	MRI	M370	Água			R\$ 389,90	
Dinamometro	Eletroventilador	HGR RACING		Água			R\$ 159,99	
Dinamometro	Disco de Freio	Hiper Freios	HF87A	Fricção			R\$ 179,00	
Dinamometro	Pinça de Freio	VW	N°509	Fricção			R\$ 299,99	
Dinamometro	Cilindro de Freio	Controil	C2173	Fricção			R\$ 150,00	
Dinamometro	Célula de Carga + HX711			Fricção	0 a 50Kg		R\$ 18,39	

Fonte: Autoria própria

As seguintes premissas de projeto são definidas para segmentação da tabela no Power Bi:

- Baixo custo, em comparação aos seus pares
- Sem limitações físicas de leitura, para possibilitar ler em diferentes pontos
- Datalogger com mais de 30 entrada disponíveis

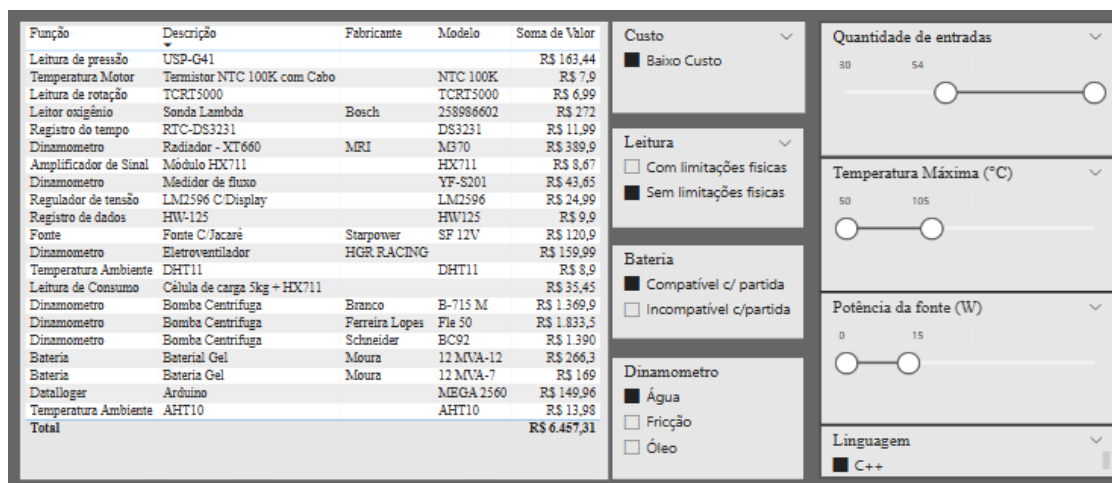
- Bateria com capacidade de acionar a partida
- Capaz de atuar até 105°C, baseado na proposta inicial de calor gerado pela bomba
- Linguagem de programação facilitada, preferencialmente C++ ao python
- Fonte que não exceda demasiadamente 15W para evitar aquecimento do LM2596
- Usar água como fluido, a fim de que se use uma bomba centrífuga

5. Seleção

5.1. Segmentação dos dados

Utilizando o Power BI, os dados da tabela foram segmentados conforme as premissas do projeto e complementados pelos dados técnicos extraídos dos datasheets dos componentes. Essa abordagem permitiu identificar as variáveis críticas para a seleção dos sensores e alinhar as especificações dos dispositivos às necessidades da banca, vide Figura 5.

Figura 5: Seleção de projeto



Fonte: Fonte: Autoria Própria

5.2. Orçamento detalhado:

Com base na segmentação anterior e a partir da aplicação de uma margem de custo de projeto de 50% do subtotal, o obtido um orçamento conforme a Tabela 7.

Figura 7: Projeto final

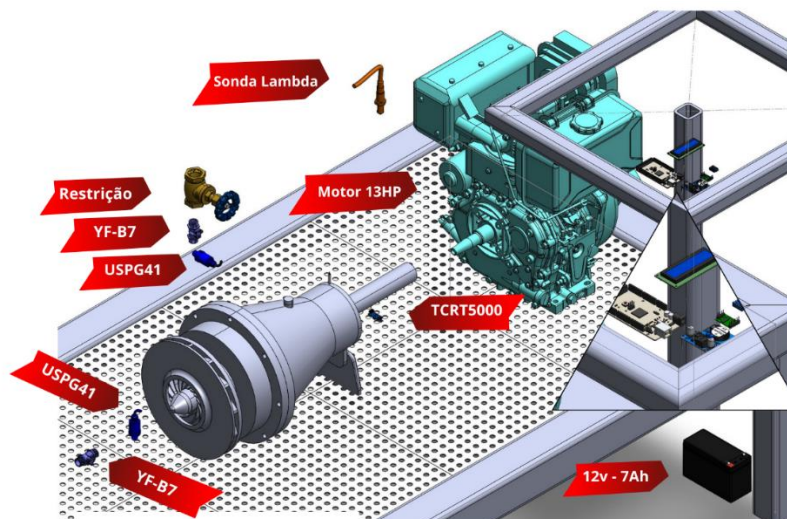
Função	Descrição	Fabricante	Modelo	Quantidade	Preço	Total
Datalogger	Arduino		MEGA 2560	1	R\$ 149,96	R\$ 149,96
Bateria	Bateria Gel	Moura	12 MVA-7	1	R\$ 169,00	R\$ 169,00
Fonte	Fonte C/Jacaré	Starpower	SF 12V	1	R\$ 120,90	R\$ 120,90
Regulador de tensão	LM2596 C/Display		LM2596	1	R\$ 24,99	R\$ 24,99
Registro de dados	HW-125		HW125	1	R\$ 9,90	R\$ 9,90
Registro do tempo	RTC-DS3231		DS3231	1	R\$ 11,99	R\$ 11,99
Leitura de rotação	TCRT5000		TCRT5000	2	R\$ 6,99	R\$ 13,98
Temperatura Motor	Termistor NTC 100K com Cabo		NTC 100K	2	R\$ 7,90	R\$ 15,80
Temperatura Ambiente	DHT11		DHT11	1	R\$ 8,90	R\$ 8,90
Leitura de pressão	USP-G41			3	R\$ 163,44	R\$ 490,32
Leitura de Consumo	Célula de carga 5kg + HX711		HX711	1	R\$ 35,45	R\$ 35,45
Leitor oxigênio	Sonda Lambda	Bosch	258986602	1	R\$ 272,00	R\$ 272,00
Dinamometro	Bomba Centrífuga	Thebe	Tha-16	1	R\$ 1.535,60	R\$ 1.535,60
Dinamometro	Válvula Globo	Hambor	PP	1	R\$ 59,00	R\$ 59,00
Dinamometro	Medidor de fluxo C/Sensor de Temp		YF-B7	2	R\$ 103,03	R\$ 206,06
Dinamometro	Radiador - XT660	MRI	M370	1	R\$ 389,90	R\$ 389,90
Dinamometro	Eletroventilador	HGR RACING		1	R\$ 159,99	R\$ 159,99
M.O	Eng. Mecânico Treinee			120	R\$ 36,80	R\$ 4.416,00
Motor	Motor estacionário 13HP	Branco	BD13.0	1	R\$ 4.746,67	R\$ 4.746,67
Projeto	Margem de Projeto (50%)			1	R\$ 4.210,00	R\$ 4.210,00
					Total	R\$ 17.046,41

Fonte: Autoria Própria

5.3. Desenho conceitual da bancada.

O desenho conceitual da bancada é desenvolvido destacando a disposição dos componentes separadamente com intuito de demonstrar a aplicação de todos os componentes projetados, como se pode ver na Figura 6, uma vista explodida simplificada em 3 dimensões.

Figura 6: Desenho conceitual



Fonte: Autoria Própria

6. Conclusão

Este trabalho demonstrou a viabilidade técnica e econômica de uma bancada dinamométrica para motores de até 24hp, cumprindo os três pilares dos objetivos propostos: custo reduzido, rigor metodológico e versatilidade aplicativa. Primeiramente, a análise mercadológica comparativa confirmou que o custo final da bancada desenvolvida é inferior a 15% do valor de equipamentos comerciais, superando a expectativa inicial de acessibilidade. Em segundo lugar, o memorial descritivo foi consolidado através da integração de sensores de pressão, vazão, temperatura, rotação e consumo de combustível, todos interoperáveis via plataforma Arduino Mega 2560, garantindo compatibilidade técnica e reprodutibilidade dos testes.

A combinação de simulações no MATLAB, para validação de princípios mecânicos e hidráulicos, com a segmentação de dados no Power BI assegurou precisão nas decisões, atendendo ao requisito de componentes capazes de gerar uma caracterização robusta de parâmetros como torque e potência, consoante ao descrito nos objetivos mais amplos. Além disso, a bancada mostrou-se adaptável a aplicações práticas conforme os objetivos mais específicos, desde pesquisas com novos combustíveis até simulações didáticas de falhas clássicas (ex.: knock, pré-ignição), expandindo seu uso além do escopo inicial.

A proposta de uma versão para motores abaixo de 6,5 HP com redução adicional de custos e as melhorias sugeridas para o Arduino, como conexão Wi-Fi e gráficos em tempo real, reforçam o potencial de escalabilidade do projeto. Assim, a bancada não apenas atende às demandas imediatas de pesquisa e ensino técnico, mas também estabelece uma base modular para futuros desenvolvimentos.

Em síntese, o trabalho comprovou que é possível conciliar baixo custo, precisão técnica e multifuncionalidade, democratizando o acesso a tecnologias críticas para a transição energética e a formação de engenheiros mecânicos.

7. Referências

- [1] SINIGAGLIA, T. ANÁLISE DO CICLO DE VIDA DA TECNOLOGIA DOS VEÍCULOS COM MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA E DOS VEÍCULOS ELETRIFICADOS. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Brasil, 31 mar. 2023.
- [2] ANFAVEA – Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores. O caminho da descarbonização do setor automotivo no Brasil. 10 ago. 2021, 67 p

- [3] EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE. DEMANDA DE ENERGIA DOS VEÍCULOS LEVES: 2018-2030, NÚMERO 01. Superintendência de Gás Natural e Biocombustíveis / Diretoria de Estudos do Petróleo, Gás e Biocombustíveis, Rio de Janeiro, out. 2018. Disponível online: <http://www.epe.gov.br> (acesso em 15/09/2024).
- [4] GRUPO DE ACOMPANHAMENTO DO PROGRAMA ROTA 2030 – Mobilidade e Logística. RELATÓRIO ANUAL DO PROGRAMA ROTA 2030 – MOBILIDADE E LOGÍSTICA. Jul. 2021.
- [5] TILLMANN, C. A. C. **Motores de Combustão Interna e seus Sistemas**. 2013. Disponível online: http://estudio01.proj.ufsm.br/cadernos/ifsul/tecnico_biocombustivel/motores_combustao_interna_e_seus_sistemas.pdf (acesso em 10/09/2024).
- [6] BRUNETTI, F. Motores de Combustão Interna (Volume 1). 1ª ed.; Blucher: São Paulo, Brasil, 2012.
- [7] MARTINS, J. Motores de Combustão Interna. 2ª ed.; Publindústria: Portugal, 2006.
- [8] NORTON, R. L. Projeto de Máquinas: Uma Abordagem Integrada. 4ª ed.; Bookman: Porto Alegre, Brasil, 2013
- [9] BRASIL. Norma Regulamentadora No. 17 (NR-17).
- [10] BRANCO MOTORES. FICHA TÉCNICA MOTOR A DIESEL BRANCO, BD-13.0. Disponível online: https://www.branco.com.br/content/dam/Branco/Latin%20America/Portuguese-BR/Files/fichas-t%C3%A9cnicas/ft_motores/FichaTecnica_Motor_BD13,0_90314190_BrancoMotores.pdf (acesso em 07/10/2024).
- [11] EBARA BOMBAS AMÉRICA DO SUL LTDA. CATÁLOGO TÉCNICO NORMALIZADAS GS - 60Hz. 09/2023. Disponível online: <https://www.ebara.com.br/downloads> (acesso em 05/01/2025).
- [12] FUNDIÇÃO FERREIRA LOPES. CATÁLOGO TÉCNICO DE PRODUTOS. Disponível online: <https://ferreiralopes.com.br/downloads/> (acesso em 12/01/2025).
- [13] SCHNEIDER. Biblioteca de Recursos Técnicos. Disponível online: <https://schneider.ind.br/mais/recursosdownloads/biblioteca/> (acesso em 12/01/2025).
- [14] ÇENGEL, Y. A.; CIMBALA, J. M. Mecânica dos Fluidos: Fundamentos e Aplicações. 3ª ed.; AMGH: Porto Alegre, Brasil, 2015.
- [15] ÇENGEL, Y. A.; GHAJAR, A. J. Transferência de Calor e Massa: Uma Abordagem Prática. 4ª ed.; AMGH: Porto Alegre, Brasil, 2012.
- [16] NELSON BLACK, ANDRÉ OGLIARI, ACIRES DIAS, JONNY CARLOS DA SIVLA, Projeto integrado de produtos: Planejamento, Concepção E Modelagem. 1ª ed.; MANOLE: Brasil, 2008.